

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIÓN**

**PERFIL DEL TRABAJO PREVIO LA OBTENCION DEL TÍTULO DE:**

**MASTER EN REDES DE COMUNICACIÓN**

**TEMA:**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED DWDM PARA AMPLIACIÓN E INTEGRACIÓN A UNA RED SDH  
EXISTENTE PARA UNA EMPRESA PROVEEDORA DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES EN  
QUITO - ECUADOR”**

**CHANGO HUILCA TELMO VINICIO**

**DIRECTOR: Dr. GERMAN AREVALO B. (PhD)**

**Quito, Febrero del 2017**

## **DEDICATORIA**

A Dios Padre a Dios Hijo y a Dios Espíritu Santo, por haberme levantado del letargo profundo y otorgarme el privilegio de desarrollar este tema.

A mis Padres, en especial a mi Madre por el apoyo incondicional hacia mi persona en todo este camino que se llama vida.

A mis hermanos/a y a mis sobrinos/as por la dicha y alegría de verlos cada día que me permiten contar con su presencia.

A esas 2 personitas especiales que están conmigo y alegran mi corazón todos los días.

**Telmo Vinicio Chango Huilca**

## TABLA DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Introducción .....	1
1.2	Antecedentes .....	1
1.3	Antecedentes .....	4
1.4	Objetivos del proyecto .....	4
1.4.1	Objetivo general.....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	5
2	CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.....	6
2.1	Introducción .....	6
2.1.1	Jerarquía de Red.....	6
2.1.1.1	Redes Long-Haul.....	6
2.1.1.2	Redes de Acceso.....	6
2.1.1.3	Metropolitan Area Network (MAN) .....	7
2.1.2	Demanda de Ancho de Banda .....	7
2.1.3	Opciones para incrementar el Ancho de Banda del carrier .....	8
2.1.4	TDM .....	9
2.1.4.1	Conceptos.....	9
2.1.4.2	Estándar SDH .....	9
2.1.4.3	WDM .....	10
2.1.4.3.1	Concepto .....	10
2.1.4.3.2	Evolución WDM.....	12
2.2	Medios de Transmisión y Técnicas de conmutación.....	12
2.2.1	Medios Guiados.....	13
2.2.1.1	Par trenzado .....	13
2.2.1.2	Cable Coaxial .....	13
2.2.1.3	Fibra Optica .....	13
2.2.1.3.1	Fibra Multimodo y Monomodo.....	15
2.2.2	Medios No Guiados .....	16
2.2.2.1	Infrarrojos.....	16
2.2.2.2	Microondas Terrestres .....	16
2.2.2.3	Satélites .....	16

2.2.3	Técnicas de conmutación .....	17
2.2.3.1	Conmutación de circuitos.....	17
2.2.3.2	Conmutación de mensajes .....	17
2.2.3.3	Conmutación de paquetes .....	17
2.3	Tecnologías de Transmisión en Redes de proveedores de servicios .....	18
2.3.1	Sistema PCM30.....	18
2.3.2	Jerarquía Digital Plesiócrons (PDH).....	18
2.3.3	Jerarquía Digital Síncrona (SDH).....	19
2.3.3.1	Trama .....	21
2.3.3.2	Estructura de Multiplexación .....	22
2.3.3.3	Taras .....	23
2.3.3.4	Arquitectura .....	23
2.3.3.5	Topologías .....	24
2.3.3.6	Sincronización .....	24
2.3.4	DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) .....	25
2.3.4.1	Funciones del Sistema DWDM .....	27
2.3.4.2	Componentes y Operación.....	28
2.3.4.3	Fibra Optica .....	29
2.3.4.4	Efectos no lineales en la fibra óptica.....	29
2.3.4.4.1	Modulación de fase inducida (SPM) .....	30
2.3.4.4.2	Modulación Cruzada de Fase (XMP) .....	31
2.3.4.4.3	Mezcla de cuatro longitudes de onda (FWM).....	31
2.3.4.4.4	Dispersión estimulada de Raman (SRS) .....	32
2.3.4.4.5	Dispersión estimulada de Brillouin (SBS) .....	32
2.3.4.5	Codificación .....	32
2.3.4.6	Emisores y Detectores de Luz.....	33
2.3.4.7	Amplificadores Opticos .....	34
2.3.4.7.1	Amplificador dopado de Erblio (EDFA) .....	35
2.3.4.7.2	Amplificador Raman.....	36
2.3.4.8	Multiplexores y Demultiplexores .....	36
2.3.4.9	Multiplexores Opticos Add/Drop .....	37
2.3.4.10	Interfaces para DWDM.....	38

2.3.4.11	Transponder .....	38
3	CAPÍTULO 3. ANALISIS TÉCNICO ECONÓMICO.....	39
3.1	Análisis técnico-económico de la factibilidad del proyecto .....	39
3.1.1	Estado actual .....	39
3.1.2	Proyección de tráfico.....	40
3.1.3	Red DWDM.....	42
3.1.4	Análisis económico.....	42
3.1.4.1	Modelo del WACC .....	43
3.1.4.2	Evaluación financiera .....	44
3.1.4.3	Resumen del flujo.....	50
3.1.4.4	Financiamiento.....	51
3.2	Selección de la tecnología y equipos para el diseño de la red .....	51
4	CAPÍTULO 4. DISEÑO DE RED DWDM PARA EL PROVEEDOR DE SERVICIOS. ....	53
4.1	Topología de Red.....	53
4.1.1	Topología punto-punto .....	53
4.1.2	Topología en Anillo.....	53
4.2	Requerimientos y consideraciones de diseño.....	54
4.2.1	Consideraciones prácticas para la implementación de DWDM .....	55
4.2.2	Presupuesto de Potencia Optico .....	56
4.2.3	Cálculo a nivel de Ancho de Banda .....	56
4.2.4	Cálculo a nivel de Ruido .....	58
4.2.5	Cálculo de la Atenuación.....	58
4.2.6	Cálculo de la dispersión.....	59
4.2.7	Cálculos teóricos.....	60
4.2.7.1	Cálculo de la atenuación. ....	60
4.2.7.2	Cálculo de la dispersión.....	61
4.2.8	Cálculo de la Ganancia .....	62
4.2.9	Cálculo de la pérdida permisible máxima en la fibra .....	62
4.2.10	Cálculo del nivel de recepción de la señal.....	63
4.2.11	Diagrama de la conexión SDH – DWDM.....	65
4.2.12	Asignación de lambdas.....	66
4.3	Funcionalidades y beneficios .....	67
4.4	Equipamiento .....	68

5	CAPITULO 5. SIMULACION DE LA RED.....	70
5.1	Selección del software se simulación.....	70
5.1.1	Optisim .....	70
5.1.1.1	Aplicaciones.....	70
5.1.2	OPTISYSTEM .....	71
5.1.2.1	Aplicaciones.....	71
5.1.2.2	Pantallas principales del programa Optisystem.....	71
5.2	SIMULACION DE LA RED DWDM. ....	74
5.2.1	Resultados obtenidos de la simulación.....	75
6	CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
6.1	Conclusiones.....	82
6.2	Recomendaciones .....	83
7	BIBLIOGRAFIA.....	84
8	ANEXOS .....	87

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Sistema de Multiplexación en longitud de onda (WDM).</i>	2
<i>Figura 2. Incremento en la velocidad de bit por un factor de cuatro en el time slot T.</i>	10
<i>Figura 3. Transmisión Básica WDM.</i>	11
<i>Figura 4. Principio de Reflexión Total Interna.</i>	14
<i>Figura 5. Estructura de trama del STM-N.</i>	21
<i>Figura 6. Estructura de Multiplexación STM-N.</i>	22
<i>Figura 7. Distribución intranodal en la arquitectura de la red de sincronización.</i>	25
<i>Figura 8. Sistema DWDM.</i>	26
<i>Figura 9. Esquema Funcional DWDM.</i>	27
<i>Figura 10. Pulso ensanchado por SPM en una fibra de dispersión negativa.</i>	30
<i>Figura 11. Señales a frecuencias <math>\nu_1</math>, <math>\nu_2</math> y sus armónicos FWM.</i>	31
<i>Figura 12. Codificación RZ y NRZ.</i>	33
<i>Figura 13. Funciones del Transponder.</i>	38
<i>Figura 14. Resumen gráfica del flujo del proyecto (Evaluación financiera)</i>	50
<i>Figura 15. Topología DWDM punto-punto.</i>	53
<i>Figura 16. Topología DWDM Anillo.</i>	54
<i>Figura 17. Diagrama General de la Red</i>	55
<i>Figura 18. Diagrama de la conexión SDH/DWDM.</i>	65
<i>Figura 19. WDM es aplicable todas las capas de red, de acceso a Backbone.</i>	68
<i>Figura 20. Pantalla principal software Optisystem</i>	72
<i>Figura 21. Pantalla proyecto nuevo software Optisystem</i>	72
<i>Figura 22. Pantalla Biblioteca de componentes software Optisystem</i>	73
<i>Figura 23. Pantalla ejemplo de diseño software Optisystem</i>	73
<i>Figura 24. Diagrama de la red Optica a ser modelada.</i>	74

<i>Figura 25. Inicio de la simulación en el simulador Optisystem .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 26. Medición de potencia a la salida del Transmisor Optico puerta 1. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 27. Medición de señal óptica en el dominio del tiempo a la salida del multiplexor óptico....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 28. Medición del espectro de la señal óptica a la salida del multiplexor óptico. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 29. Plan de canales DWDM con separación 100 GHz. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 30. Medición de la señal óptica a la salida del multiplexor óptico mediante el analizador WDM. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 31. Medición de potencia a la salida del Demultiplexor Optico puerta 1. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 32. Diagrama de ojo – medición realizada a la salida del receptor óptico. ....</i>	<i>81</i>



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Estándares PDH.</i>	18
<i>Tabla 2. Interfaces de la Jerarquía Digital Síncrona (SDH) y la analogía con SONET.</i>	19
<i>Tabla 3. Ventajas de SDH.</i>	20
<i>Tabla 4. Número de canales para cada espaciamiento definido en la recomendación ITU-T G.694.1.</i>	27
<i>Tabla 5. Amplificadores.</i>	36
<i>Tabla 6. Comparación de Amplificadores Opticos.</i>	36
<i>Tabla 7. Atributos G.652.D.</i>	39
<i>Tabla 8. Distancias entre Nodos – Red Propuesta.</i>	40
<i>Tabla 9. Consumo de Ancho de Banda desde 2014 a 2016.</i>	40
<i>Tabla 10. Proyección de ancho de banda de 2016 a 2024</i>	42
<i>Tabla 11. Tabla resumen referente al Opex del proyecto.</i>	44
<i>Tabla 12. Tabla resumen referente al Capex del proyecto.</i>	45
<i>Tabla 13. Tabla resumen del abono por ancho de banda contratado y por instalación en los 3 años proyectados.</i>	46
<i>Tabla 14. Tabla resumen del abono Total por ancho de banda contratado y por instalación en los 3 años proyectados.</i>	46
<i>Tabla 15. Tabla resumen del valor neto en los 3 años proyectados.</i>	47
<i>Tabla 16. Tabla resumen del valor presente en los 3 años proyectados.</i>	48
<i>Tabla 17. Tabla resumen del valor presente acumulativo en los 3 años proyectados.</i>	48
<i>Tabla 18. Tabla resumen del valor del Gross Margin en los 3 años proyectados.</i>	49
<i>Tabla 19. Tabla resumen del valor del Gross Margin porcentual en los 3 años proyectados.</i>	49
<i>Tabla 20. Tabla resumen con los valores de WACC, Máxima exposición de caja, Punto de equilibrio, VAN y Gross Margin porcentual.</i>	50
<i>Tabla 21. Costo Total y costo a financiar.</i>	51
<i>Tabla 22. Tabla de amortización (tiempo: 5 años).</i>	51

<i>Tabla 23. Atenuación Enlace Nodo principal – Nodo secundario 1.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 24. Atenuación Enlace Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2 .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 25. Atenuación Enlace Nodo Principal – Nodo secundario 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 26. Valores de Potencia de salida del transmisor y Sensibilidad del receptor.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 27. Valores de atenuación de cada enlace. ....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 28. Valores de pérdida total debido a la fibra en cada enlace. ....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 29. Valores de potencia de salida del transmisor y Valores de atenuación de cada enlace. ..</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 30. Asignación de lambdas para los clientes (carriers). ....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 31. Listado de equipos probables a utilizarse en el planteamiento del proyecto. ....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 32. Parámetros a ser utilizados en la simulación de la red DWDM. ....</i>	<i>75</i>

## INDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Potencia de Transmisión. ....</i>	56
<i>Ecuación 2. Dispersión Temporal Total. ....</i>	56
<i>Ecuación 3. Dispersión Total Cromática. ....</i>	57
<i>Ecuación 4. Ancho de banda de la fibra óptica. ....</i>	57
<i>Ecuación 5. Relación Señal a Ruido Optico.....</i>	58
<i>Ecuación 6. Atenuación del enlace. ....</i>	58
<i>Ecuación 7. Límite de Dispersión. ....</i>	59

## 1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Introducción

Actualmente la Red de Transporte SDH<sup>1</sup> (Red de Conmutación de Datos Legacy) de la empresa proveedora de Telecomunicaciones en la Ciudad de Quito se encuentra constituida o diseñada en base a equipamiento de multiplexores<sup>2</sup> AMU<sup>3</sup> que se encargan de tomar varias señales eléctricas u ópticas y las envía como una sola. La Red SDH se fue construyendo en base a requerimientos de conexiones, capacidades y necesidades de los clientes y Backbone, formándose la misma en base a anillos STM-1<sup>4</sup>, STM-4<sup>5</sup>, STM-16<sup>6</sup>.

Al paso del tiempo, esta Red fue llegando a su límite en capacidad y en la actualidad la Topología no permite entregar servicios de capacidades mayores a STM-1, provocando la pérdida de ingresos significativos para la corporación debido al rechazo de factibilidades de clientes que requieren estas velocidades o no llevar a cabo negocios debido a esta problemática. En la actualidad se tiene requerimientos de altas velocidades que van desde STM-16 hasta 10G.

Otra problemática que se presenta es la actual capacidad de conexión entre los equipos del proveedor de servicios y el Proveedor Internacional en los puntos frontera, teniendo como la mayor capacidad de conexión STM-4. Siendo esta capacidad insuficiente para las conexiones Internacionales y locales (Quito – Guayaquil), para este caso la red DWDM nos aportaría con los elementos necesarios para ampliar la capacidad de manera fácil y flexible y esta se realizaría desde el POP de Quito hacia el Proveedor Internacional.

### 1.2 Antecedentes

Para la construcción de Redes de Telecomunicaciones desde hace varios años se utiliza la fibra óptica, por las ventajas que aporta y sus casi nulas desventajas: así, las redes ópticas son unos sistemas que transportan las señales que se quieren transmitir por medio de la utilización de la fibra como principal transmisor. Las redes ópticas no tienen problemas a la hora de soportar cualquiera de las velocidades comunes en telecomunicaciones y admiten cualquier formato de la señal, cualquier protocolo y cualquier jerarquía; deben incorporar los equipos necesarios para la prestación de servicios específicos a los usuarios finales en los extremos de la red.

---

<sup>1</sup> SDH: Synchronous Digital Hierarchy

<sup>2</sup> Circuito combinacional que tiene varios canales de entrada y solo una salida.

<sup>3</sup> AMU: Access Multiplexer Universal

<sup>4</sup> STM-1: Synchronous Transport Module-level1 (155,52 Mbps)

<sup>5</sup> STM-4: Synchronous Transport Module-level4 (622,08 Mbps)

<sup>6</sup> STM-16: Synchronous Transport Module-level16 (2.488,32 Mbps)

No obstante, dependiendo de la tecnología de la fibra utilizada y de los equipos, la red óptica, en su conjunto, tendrá una determinada capacidad. Para aumentar ese límite, una solución, sencilla pero que puede resultar muy costosa, es tender más fibras ópticas o bien aumentar la capacidad de la fibra disponible mediante técnicas avanzadas. WDM<sup>7</sup> permite la transmisión simultánea de diferentes longitudes de onda por la misma fibra óptica, logrando así aumentar la capacidad propia del medio de transmisión.

SDH es una red de transporte digital de todo tipo de información. El empleo de una transmisión digital síncrona<sup>8</sup>, además de ofrecer un gigantesco ancho de banda, simplifica los mecanismos de acceso al sistema de transporte a la vez que facilita las labores de mantenimiento y gestión de la red. SDH elimina todos los inconvenientes de PDH<sup>9</sup> y ofrece beneficios al operador de red y al usuario final.

La combinación en las redes de telecomunicación SDH/WDM resulta muy apropiada y consigue el máximo rendimiento de los medios y sistemas empleados, además, los multiplexores WDM son más fiables y baratos que los eléctricos. WDM consiste en la transmisión de dos o más flujos de información simultáneos sobre la misma fibra óptica, en el mismo sentido o en sentidos opuestos, utilizando una longitud de onda distinta para cada canal (Figura 1.). Si la transmisión de los flujos ocurre en el mismo sentido, entonces se aumenta la capacidad del enlace, multiplicando la capacidad inicial por el número de longitudes de onda multiplexadas. Si se aplican flujos de información en sentidos opuestos, aumenta la flexibilidad del sistema.

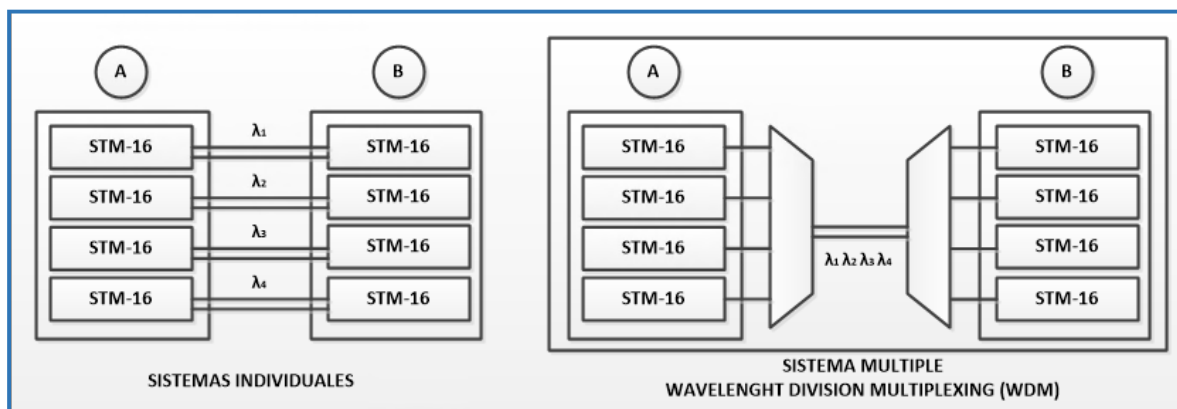


Figura 1. Sistema de Multiplexación en longitud de onda (WDM).

Fuente: HUIDROVO, J. M. (2003). TECNOLOGIAS AVANZADAS DE TELECOMUNICACIONES. Thompson Editores Spain, Paranainfo S.A. página 54 Figura 3.8.

<sup>7</sup> WDM: Wavelength Division Multiplexing

<sup>8</sup> Se refiere a que las señales se dan a igual fuente de reloj.

<sup>9</sup> PDH: Plesiochronous Digital Hierarchy

Existen dos métodos usualmente utilizables para realizar la multiplexación de señales dentro del sistema de fibra óptica que hace uso del láser, estos son: TDM<sup>10</sup> y FDM<sup>11</sup>, a estos dos se añade WDM. Lo que diferencia a WDM de otras tecnologías es que cada señal va con una frecuencia láser diferente.

La multiplexación TDM es utilizada de manera habitual para el aumento de velocidad de transferencia (cabe indicar que existen otras opciones), pero presenta el inconveniente de saltos en la capacidad del sistema. El inconveniente radica en que para trasladarse de un nivel a otro se lo debe efectuar inmediatamente y esto puede llegar a ser excesivo.

Para la tecnología DWDM<sup>12</sup> mediante el uso de fibra óptica este incremento puede darse en 4, 8, 16, 32, 64 y aún más, si el número de canales (longitudes de onda) a multiplexarse es mayor a 8 la tecnología es llamada: DWDM.

DWDM combina múltiples señales ópticas, estas señales llegan a ser amplificadas como un solo grupo y pueden ser transportadas a través de una única fibra, lo que incrementa la capacidad. Estas señales pueden viajar a distintas velocidades y formatos, ejemplos de estos son:

*velocidades: STM1/OC-3 a STM-64/OC-192<sup>13</sup>*

DWDM permite que la capacidad de la fibra óptica que se encuentra en operación se incremente, esto es una gran ventaja para los administradores de red y proveedores de servicios ya que, las ofertas hacia los clientes serían mayores (voz, datos, multimedia de diferente tipo) y con administración de ancho de banda a través de OXC<sup>14</sup> y ADM<sup>15</sup>.

Una red DWDM está pensada para aumentar la capacidad de transmisión de la fibra ya existente y admite múltiples canales en la fibra (el número y naturaleza de los canales depende del equipo y suministrador). A diferencia de las redes de larga distancia, la red DWDM se adapta a las necesidades de rendimiento y de costes del entorno metropolitano y ofrece unos servicios de gran longitud de onda y flexibilidad.

Una gran ventaja de WDM es que en la utilización de los anillos ópticos flexibles es posible el envío de igual información pero en diferentes longitudes de onda cuyo resultado puede ser verificado en el receptor y si hubiese inconvenientes en uno de los canales la conmutación sería rápida. La falla en este esquema es que al presentarse daño en la fibra óptica la comunicación se vería afectada completamente.

---

<sup>10</sup> TDM: Time Division Multiplexing

<sup>11</sup> FDM: Frequency Division Multiplexing

<sup>12</sup> DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

<sup>13</sup> Synchronous Transport Module-level1 / Optical Carrier-3 (155,52 Mbps) a Synchronous Transport Module-level64 / Optical Carrier-192 (9.953,28 Mbps)

<sup>14</sup> OXC: Optical CrossConnect

<sup>15</sup> ADM: Add Drop Multiplexer

La Red SDH que se encuentra operativa actualmente entre el Proveedor de servicios y el Proveedor Internacional así como la conexión entre ciudades cuyo ancho de banda es STM-16, se ve limitada para ofrecer nuevos servicios ya que se encuentra casi al 100% de su capacidad. En base a la infraestructura actual y en vista de la situación actual país, se busca alternativas para que la solución sea factible, en precio, costo, escalabilidad, flexibilidad y soporte, es por esta razón que se ha llegado a la conclusión que DWDM es la opción más adecuada que la Red de Transporte necesita para el incremento en capacidad.

### **1.3 Antecedentes**

Ante el eventual incremento de tráfico y necesidad de clientes por contar con un ancho de banda efectivo, factibilidades positivas, implementación a corto plazo y con sistemas de protección imperceptibles, el objetivo es optimizar la red actual de manera que la red sea capaz de:

1. Contar con un ancho de banda adecuado a las nuevas exigencias de clientes. Para el efecto la propuesta es el diseño de una red DWDM sobre la actual Infraestructura en Planta Externa de manera de maximizar el uso de las fibras. con mínimo impacto sobre los actuales servicios si se llega a la efectividad del mismo.
2. Tener la capilaridad adecuada para las nuevas exigencias.
3. La red DWDM de Quito se plantea entre los siguientes nodos: POP Proveedor de servicios y Proveedor Internacional.
4. Mejora en capacidad de salida internacional a través del Proveedor Internacional.

La red DWDM vendría a solucionar problemas de transporte y capacidades posibles de negociar con clientes que requieren altas velocidades de operación.

### **1.4 Objetivos del proyecto**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar y simular un sistema DWDM para ampliación de capacidad de transporte de la red SDH en la ciudad de Quito para un proveedor de servicios de Telecomunicaciones.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Analizar las características y limitaciones de la infraestructura actual de la red.
2. Analizar la factibilidad técnico-económica para la migración de la red SDH a una red DWDM.
3. Diseñar una red DWDM con el fin de mejorar la capacidad de salida internacional a través de los proveedores internacional y local.
4. Simular la red DWDM diseñada y analizar su rendimiento.



## 2 CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.

### 2.1 Introducción

#### 2.1.1 Jerarquía de Red

Las redes de comunicaciones modernas se encuentran en constante evolución. Varios temas tales como: nuevas aplicaciones, cambios en modelos de uso y redistribución de contenido hacen que la definición de redes sea un trabajo progresivo. Pero, se puede definir a redes globales basadas en temas como: tecnología de transporte, distancia, aplicaciones, etc.

Una manera de descripción de la Red de Area Metropolitana (MAN<sup>16</sup>) es indicar que no es la long-haul ni que forma parte de la red de acceso, sino que es la parte que se encuentra entre estas dos.

##### 2.1.1.1 Redes Long-Haul

Son el núcleo o core de la Red Global. Dominada por un pequeño grupo de grandes transnacionales y carriers globales, la redes long-haul conectan las MAN. La preocupación principal es capacidad debido a que su enfoque es el transporte. En varios casos estas redes basadas en tecnología SONET<sup>17</sup> o SDH<sup>18</sup>, experimentan un agotamiento de fibra como resultado de una demanda alta de ancho de banda.

##### 2.1.1.2 Redes de Acceso

Estas redes están más cerca al usuario final, al límite de la MAN. Se caracterizan por contar con diversos protocolos e infraestructuras y abarcan un amplio rango de velocidades. El predominio de tráfico IP, con su inherente naturaleza impredecible, asimétrica y a ráfagas, presenta muchos retos, especialmente con las nuevas aplicaciones en tiempo real.

Al mismo tiempo, se requieren estas redes para continuar con el soporte de protocolos y tráfico Legacy, tal como ESCON<sup>19</sup> de IBM.

---

<sup>16</sup> MAN: Metropolitan Area Network

<sup>17</sup> SONET: Synchronous Optical Network

<sup>18</sup> SDH: Synchronous Digital Hierarchy

<sup>19</sup> SCON: Enterprise System Connection

### 2.1.1.3 Metropolitan Area Network (MAN)

Las MAN poseen varias de las características de las redes de acceso, así como múltiples protocolos de red y velocidades de canal. Tradicionalmente se han basado en tecnologías SONET o SDH, haciendo uso de topologías anillo o punto-punto con multiplexores Add/Drop (ADMs<sup>20</sup>)

### 2.1.2 Demanda de Ancho de Banda

En base al crecimiento de tráfico de datos, se presenta la demanda de ancho de banda en la red (tal es el caso del Protocolo de Internet - IP<sup>21</sup>). Principales proveedores de internet indican un aumento de casi el doble en ancho de banda en los Backbones<sup>22</sup> (en períodos de 6 a 9 meses) esto en base al crecimiento de tráfico de internet (300% por año) y al crecimiento del tradicional tráfico de voz (13% anual).

El tráfico transportado en un Backbone se puede originar como aquel basado en circuito (TDM<sup>23</sup>), basado en paquete (IP) ó basado en celda (ATM<sup>24</sup>, Frame Relay<sup>25</sup>). Existe además un incremento proporcional de datos sensitivos al retardo<sup>26</sup>, tales como voz sobre IP y streaming<sup>27</sup> de video.

Este asombroso crecimiento en la demanda de ancho de banda y junto a IP como el cimiento en común para todos los servicios, los proveedores long-haul<sup>28</sup> están dirigiendo su mirada fuera de los sistemas que se basan en TDM.

Las redes metropolitanas se encuentran experimentando de igual forma el impacto de la congestión por el crecimiento, además de requerimientos apresurados que llaman a que el aprovisionamiento sea más simple y rápido lo que no es posible con tecnologías y equipamiento antiguo.

---

<sup>20</sup> ADMs: Add/Drop Multiplexers

<sup>21</sup> IP: Internet Protocol – es un identificador (número) de un equipo o dispositivo dentro de una red.

<sup>22</sup> Se refiere a las principales troncales, compuestas por grandes equipos que manejan grandes capacidades para el transporte de datos entre ciudades, países o continentes.

<sup>23</sup> TDM: Time Division Multiplexing – Técnica de multiplexación en la cual el ancho de banda completo del medio físico es asignado a cada canal en un intervalo de tiempo del tiempo total.

<sup>24</sup> ATM: Asynchronous Transfer Mode – Tecnología de multiplexado y conmutación de velocidad alta.

<sup>25</sup> Frame relay: Red de conmutación de paquetes, transporta paquetes de longitud no fija en redes wan o lan.

<sup>26</sup> Se refiere al tiempo que se espera entre 2 eventos.

<sup>27</sup> Se refiere al reparto digital de un contenido multimedia.

<sup>28</sup> Se refiere a redes de largo alcance.

### 2.1.3 Opciones para incrementar el Ancho de Banda del carrier<sup>29</sup>

Frente al reto de un incremento dramático de capacidad mientras se restringen costos, los carriers tienen dos opciones: instalar nueva fibra o incrementar el ancho de banda efectivo de fibras existentes. Colocar nuevas fibras es el medio tradicional de los carriers para ampliar sus redes. Desplegar nueva fibra, sin embargo, es una propuesta costosa. Colocar nueva fibra toma sentido solo cuando es deseable expandir la base instalada.

Incrementar la capacidad efectiva de fibras existentes puede ser llevada a cabo de dos formas:

1. Incrementar la velocidad de bits de sistemas existentes:
  - a. Utilizando TDM, datos son ahora rutinariamente transmitidos a 2.5 Gbps (STM-16<sup>30</sup>) e incrementándose a 10 Gbps (STM-64<sup>31</sup>). Avances recientes dan como resultado velocidades de 40 Gbps (STM-256<sup>32</sup>). Los circuitos electrónicos que hacen esto posible sin embargo son costosos y complejos tanto para la compra como para el mantenimiento. Además existen problemas técnicos significativos que restringen la aplicación de esta propuesta.
  - b. Transmisión a STM-64 sobre fibra monomodo (Single-mode), por ejemplo, es 16 veces más afectada por Dispersión Cromática (CD<sup>33</sup>) que la velocidad de agregado próxima más baja (STM-16). La potencia de transmisión más alta requerida por las velocidades de bit más altas inyectan efectos no lineales que podrían estropear la calidad de la forma de onda.
  - c. Finalmente, Dispersión por modo de polarización (PMD<sup>34</sup>), otro efecto que limita la distancia que un pulso de luz puede viajar sin degradación, es también un problema.
2. Incrementar el número de longitudes de onda en una fibra

---

<sup>29</sup> En Telecomunicaciones, carrier es un operador que administra las troncales para el transporte de datos, internet, telefonía.

<sup>30</sup> Synchronous Transport Module-level16 (2.488,32 Mbps)

<sup>31</sup> Synchronous Transport Module-level64 ( 9.953,28 Mbps)

<sup>32</sup> Synchronous Transport Module-level256 ( 39.813,12 Mbps)

<sup>33</sup> CD: Chromatic Dispersion

<sup>34</sup> PMD: Polarization Mode Dispersion

En esta propuesta, varias longitudes de onda son combinadas en una única fibra. Utilizando tecnología WDM<sup>35</sup>, varias longitudes de onda o luces coloreadas pueden simultáneamente multiplexar señales de 2.5 a 40 Gbps cada una sobre un hilo de fibra.

Sin tener que colocar nuevas fibras, la capacidad efectiva de la planta externa existente puede rutinariamente incrementarse en un factor de 16 o 32. Sistemas con 128 y 160 longitudes de onda están en operación hoy, con una densidad más alta en el horizonte. Los límites específicos de esta tecnología aún no son conocidos.

#### 2.1.4 TDM

##### 2.1.4.1 Conceptos

TDM fue concebido como un método de aumentar la cantidad de tráfico de voz que podía ser llevado sobre un medio. En telefonía antes que la multiplexación fuese ideada, cada llamada necesitaba su propio enlace físico. Dicha solución probó ser no escalable y cara. Con el uso de la multiplexación, sobre un único enlace más de una llamada podía ser colocada.

TDM incrementa la capacidad del enlace de transmisión mediante la división del tiempo en intervalos más pequeños de tal forma que los bits de múltiples fuentes de entrada pueden ser llevados sobre el enlace.

Sin embargo, este método resulta ineficiente ya que cada slot de tiempo es reservado aun cuando no existan datos a ser enviados. Este inconveniente es aplacado mediante el empleo de multiplexación estadística utilizada en ATM (aunque presenta mejor empleo de ancho de banda, tiene limitantes en cuanto a la velocidad a entregar).

##### 2.1.4.2 Estándar SDH

En Telecomunicaciones se acogió SONET o SDH para que los datos TDM sean transportados en forma óptica. Estos estándares especifican:

1. Parámetros de las interfaces.
2. Velocidades.
3. Formatos de trama.
4. Métodos de multiplexación.

---

<sup>35</sup> WDM: Wavelength Division Multiplexing

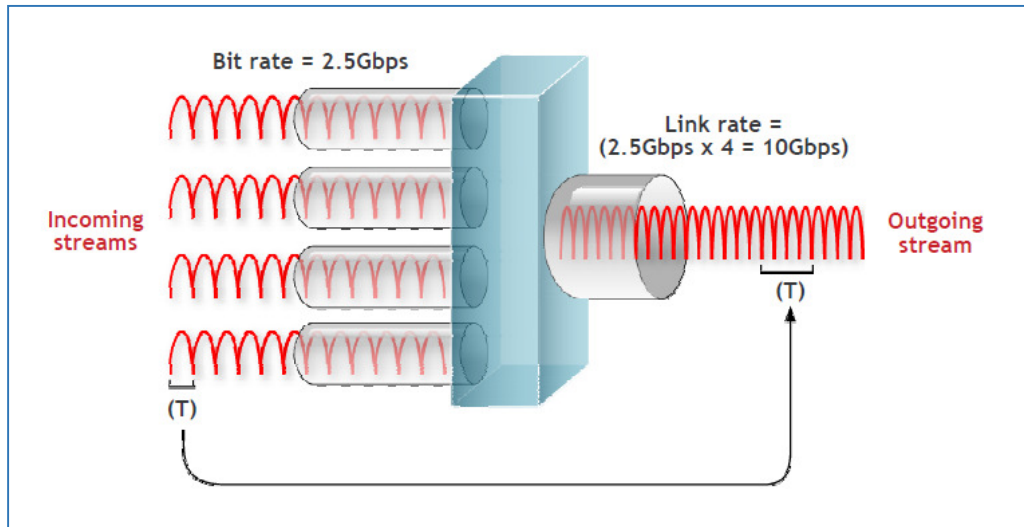


Figura 2. Incremento en la velocidad de bit por un factor de cuatro en el time slot T.

Fuente: *Transmission Networks WDM Technology Fundamentals* - Alcatel-Lucent.

SONET o SDH toma tráfico de  $n$  bits, multiplexa los datos, modula ópticamente la señal y la envía hacia el exterior utilizando un dispositivo emisor de luz sobre la fibra a una velocidad de bit igual a la velocidad de bit de entrada  $\times n$ .

Así por ejemplo el tráfico que llega al multiplexor SONET o SDH desde cuatro lugares a 2.5 Gbps saldrá como un único flujo a 10 Gbps. Este principio se muestra en la Figura 2.

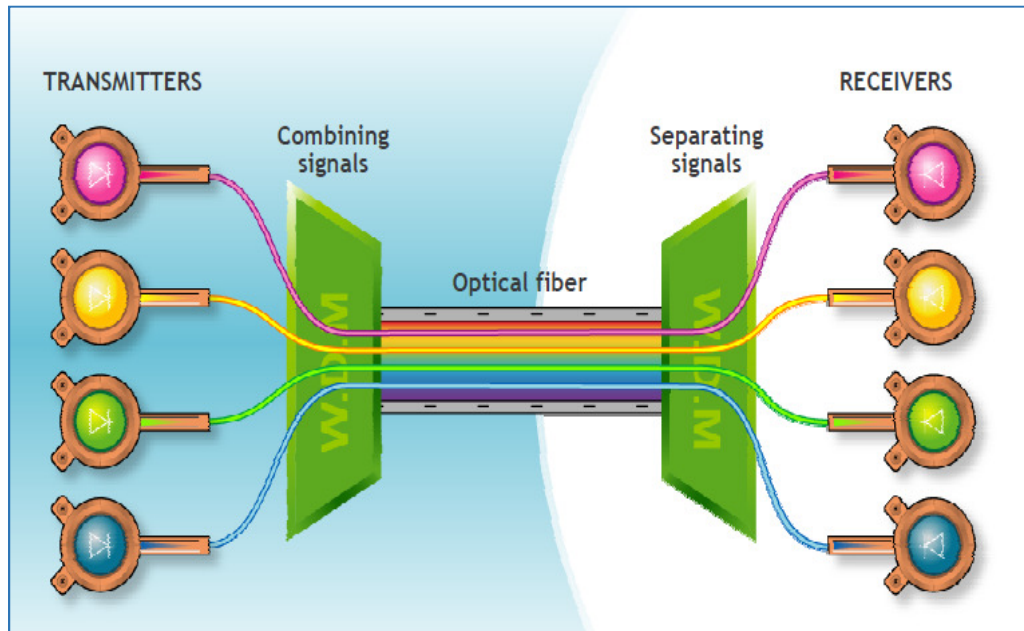
#### 2.1.4.3 WDM

##### 2.1.4.3.1 Concepto

WDM extiende la capacidad de carga de la fibra óptica, para lo cual hace uso de un método distinto a TDM. WDM establece frecuencias de luz ( $\lambda$ s) específicas para cada señal de entrada óptica en una cierta banda de frecuencias. Una manera de pensar referente a WDM es que un color diferente de luz es asociado a un cierto canal, por lo que varios canales entonces conformarían un arco iris.

Cada una de las longitudes de onda en un sistema WDM entonces es puesta o ubicada en la fibra óptica y el extremo receptor es quien realiza la demultiplexación de las señales. La capacidad resultante (similar a TDM) es una sumatoria de las señales de entrada, pero con el atenuante que WDM transporta cada señal de entrada de manera aislada una de la otra.

Esto nos indica o nos hace presumir que cada señal contaría con un ancho de banda dedicado. Todas las señales entonces arriban al mismo tiempo, en lugar de ser divididas y transportadas en slots de tiempo (ver Figura 3).



*Figura 3. Transmisión Básica WDM.*

*Fuente: Transmission Networks WDM Technology Fundamentals - Alcatel-Lucent.*

Una diferencia fundamental entre SDH TDM y WDM es que WDM puede transportar múltiples protocolos sin contar con un formato común, mientras que SDH no lo puede llevar a cabo.

En SDH TDM señales síncronas y asíncronas son recogidas y multiplexadas a una sola velocidad de bits superior para la transmisión. Existirán casos en los que las señales de entrada deberán ser convertidas de eléctricas a ópticas, o de ópticas a eléctricas y de nuevo a ópticas antes de llevar a cabo la multiplexación. WDM recoge múltiples señales ópticas, les asigna longitudes de onda individuales y luego las multiplexa sobre una sola fibra óptica.

Desde los puntos de vista económico y técnico, la practicidad de proveer capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más destacada de WDM. La inversión en planta externa no solo puede ser conservada sino optimizada.

En vista que la demanda es cambiante, mayor capacidad puede ser adicionada, ya sea por una simple mejora en el equipamiento o por el incremento de lambdas en la fibra. Se puede conseguir capacidad sin mayor costo de equipamiento mientras se mantiene la inversión en la planta de fibra existente.

#### 2.1.4.3.2 Evolución WDM

Los sistemas WDM primeros transportaron dos o cuatro longitudes de onda que estuvieron ampliamente espaciados. WDM y las tecnologías siguientes CWDM<sup>36</sup> y DWDM<sup>37</sup> han evolucionado mucho más allá de esta limitación temprana.

Los sistemas WDM tradicionales pasivos son muy difundidos siendo los despliegues normales canales de 2, 4, 8, 12 y 16. Esta técnica usualmente tiene una limitación en la distancia de menos de 100 kilómetros.

Hoy. CWDM típicamente utiliza espaciado de 20 nm (3000GHz) de hasta 18 canales. La Recomendación CWDM - UIT-T G.694.2 proporciona un plan de longitudes de onda para las distancias objetivo de hasta 50 km en fibras monomodo como se especifica en las recomendaciones UIT-T G.652, G.653 y G.655. El plan para CWDM se compone de 18 longitudes de onda definidas dentro del rango de 1270 nm a 1610 nm espaciadas 20 nm.

El espaciamiento común DWDM puede ser de 200, 100, 50 o 25 GHz con número de canales de hasta 128 o más a distancias de varios miles kilómetros con amplificación y regeneración a lo largo de la ruta.

## 2.2 Medios de Transmisión y Técnicas de conmutación

Para que una comunicación y/o transmisión a distancia se realice se necesita de medios de transmisión capaces de realizar el transporte de señales eléctricas mucho más allá de pocos metros, sean estos cientos o miles de kilómetros. Estos medios se clasifican en guiados y no guiados.

---

<sup>36</sup> CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing

<sup>37</sup> DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

## 2.2.1 Medios Guiados

### 2.2.1.1 Par trenzado

Este tipo de medio consiste de un par de cables por cada enlace de comunicación los cuáles se encuentran aislados. Para disminuir la interferencia electromagnética estos cables se entrelazan helicoidalmente pero tiene la desventaja de ser muy sensible a ruido e interferencia. Se los puede emplear para comunicación analógica como digital, su ancho de banda va de la mano con su diámetro y distancia de instalación. Es el más utilizado debido a su costo bajo y fácil instalación.

### 2.2.1.2 Cable Coaxial

Está compuesto por un conductor de cobre interno rodeado por un material aislante. Este aislante se recubre por un conductor que usualmente se trata de una malla trenzada y finalmente por una capa protectora de plástico.

La construcción de este cable ocasiona un gran ancho de banda y una buena inmunidad a interferencias lo que lo hace más costoso que el par trenzado. Es reemplazado siempre que sea factible por fibra óptica debido a los inconvenientes de atenuación, ruido térmico y ruido de intermodulación.

### 2.2.1.3 Fibra Optica

La función primordial de la fibra óptica es encaminar las ondas de luz con un mínimo de atenuación (pérdida de señal). Se compone de hilos finos de vidrio en capas llamadas:

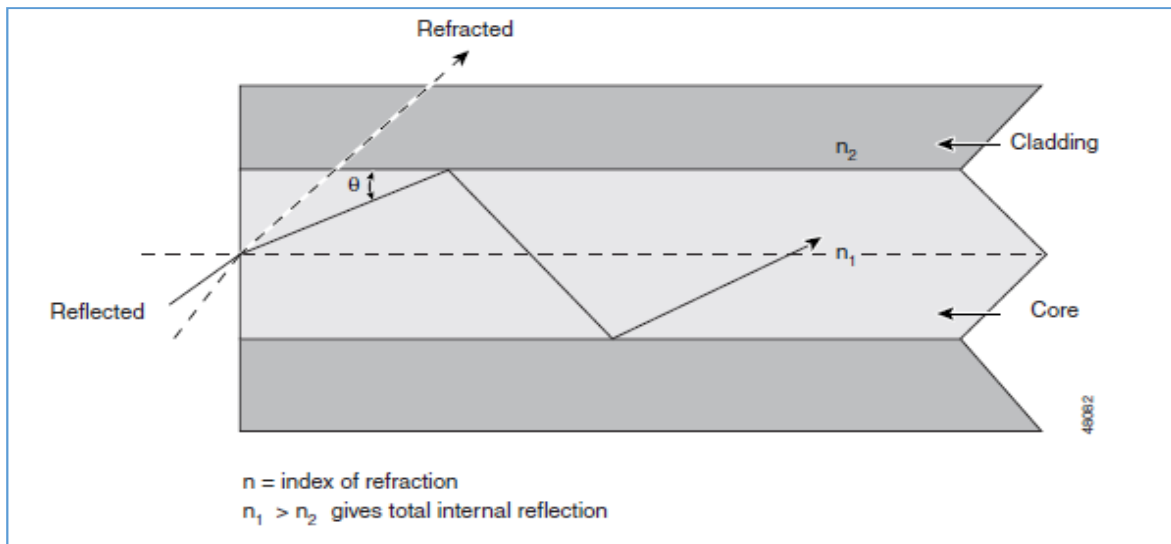
1. Núcleo (core).
2. Revestimiento (cladding).

Estos elementos pueden trasladar luz en alrededor de dos tercios de la velocidad de la luz en el vacío. En base al principio de reflexión total interna<sup>38</sup>, se puede explicar el proceso de transmisión de la luz en la fibra óptica. Con este fundamento se puede decir que se refleja el 100% de luz que incide sobre una superficie.

---

<sup>38</sup> Cuando la luz incide sobre un medio de menor índice de refracción, el rayo se desvía de la normal, de tal manera que el ángulo de salida es mayor que el ángulo incidente. A tal reflexión se le llama comúnmente "reflexión interna". El ángulo de salida alcanzará los 90°, para algún ángulo de incidencia crítico  $\theta_c$ , y para todos los ángulos de incidencia mayor que este ángulo crítico, la reflexión interna será total. (Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/totint.html>)





*Figura 4. Principio de Reflexión Total Interna.*

*Fuente: Introduction to DWDM Technology – Cisco Systems.*

La luz o bien se refleja (rebota) o bien se refracta (su ángulo es alterado al pasar por un medio diferente) esto depende del ángulo de incidencia<sup>39</sup>.

La reflexión interna total<sup>40</sup> ocurre al presentarse las siguientes condiciones:

1. Los haces transitan por un material más denso a uno menos denso. Aquí viene el concepto de índice de refracción del material<sup>41</sup>.
2. El ángulo de incidencia es más pequeño que el ángulo crítico<sup>42</sup>.

En la Figura 4, se muestra el principio de reflexión total interna dentro del núcleo de una fibra. El núcleo tiene un índice de refracción mayor al del revestimiento, esto permite que el haz que incide en la superficie sea menor que el ángulo crítico a ser reflejado. El segundo haz no cumple con el requerimiento de ángulo crítico y se refracta.

<sup>39</sup> Angulo de incidencia: Angulo en el que la luz incide en la interface entre un material ópticamente más denso y ópticamente más delgado.

<sup>40</sup> Cuando la luz incide sobre un medio de menor índice de refracción, el rayo se desvía de la normal, de tal forma que el ángulo de salida es mayor que el ángulo incidente.

<sup>41</sup> Índice de Refracción (n): Se conoce como la diferencia entre la densidad óptica de un material dado y el vacío.

<sup>42</sup> Angulo crítico: Angulo de incidencia en el que la luz deja de ser refractada y en su lugar es totalmente reflejada.

La fibra óptica se compone de dos tipos distintos de vidrio sólido (sílica) de elevada pureza (core y cladding) que se combinan con componentes específicos a los cuáles se los llama dopantes (esto adecúa los índices de refracción). La desigualdad que se presenta entre los índices de refracción del core y cladding ocasiona que la mayor parte de la luz transmitida rebote en el revestimiento y permanezca dentro del núcleo.

El requisito de ángulo crítico se cumple a través del control del ángulo en el que la luz es inyectada en la fibra. El recubrimiento protector alrededor del cladding consistente de dos o más capas asegura que el vidrio pueda ser manipulado sin daño.

#### 2.2.1.3.1 Fibra Multimodo y Monomodo

La Fibra Multimodo consta de un núcleo más grande que el de la fibra Monomodo. Recibe el nombre en vista que múltiples modos<sup>43</sup> pueden ser llevados simultáneamente a través de la fibra óptica.

1. El primer tipo de fibra Multimodo es la que se conoce como de índice escalonado y hace referencia a que existe un índice de refracción uniforme a través del núcleo pero se presenta un cambio abrupto (paso) en el índice de refracción en la interfaz núcleo-revestimiento.
2. El segundo tipo de fibra Multimodo se conoce como de índice gradual y hace referencia a que el índice de refracción del núcleo disminuye de forma gradual desde el centro del núcleo hacia el exterior.
3. La velocidad de algunos haces de luz es reducida mediante la refracción más alta en el centro del núcleo, lo que ocasiona que todos los haces de luz arriben al destino casi al mismo tiempo y con dispersión modal<sup>44</sup> reducida.

La fibra óptica Monomodo tiene un núcleo mucho más pequeño que permite solo un modo a la vez. El resultado de eso es que la fidelidad de la señal se mantiene de mejor manera en distancias más grandes y con reducida dispersión modal. Estos atributos le adjudican una capacidad de mayor ancho de banda.

Debido a la gran capacidad de transporte de información y baja pérdida inherente, las fibras monomodo son preferidas para aplicaciones de considerable ancho de banda y para distancias largas, incluyendo DWDM.

Debemos en este punto considerar algunos aspectos en la transmisión de señales sobre las fibras ópticas respecto a su importancia para DWDM:

---

<sup>43</sup> Modo: Trayectoria de un haz de luz.

<sup>44</sup> Dispersión modal: es la disparidad entre los tiempos que los rayos de luz llegan a su destino.

1. Espaciado entre canales<sup>45</sup>: El ancho de banda del amplificador y la capacidad del receptor en diferenciar dos longitudes de onda adyacentes condicionan este punto.
2. Direccionalidad de la red: Por naturaleza la fibra óptica es un medio de transmisión dúplex<sup>46</sup>. Esta característica permite llevar a cabo dos tipos de sistemas-unidireccionales<sup>47</sup> y bidireccionales<sup>48</sup>.

## 2.2.2 Medios No Guiados

### 2.2.2.1 Infrarrojos

En este caso deben encontrarse alineados tanto el transmisor como el receptor ya que puede existir reflexión de la luz o rayo en superficies adyacentes. No se requiere de licencia para su empleo, con el láser la distancia que se cubre es mucho mayor. La IrDA<sup>49</sup> es una organización encargada de crear el software y hardware para las comunicaciones inalámbricas por luz infrarroja.

### 2.2.2.2 Microondas Terrestres

Se utiliza el espacio aéreo para la transmisión, es una opción al cable de cobre, coaxial o fibra y como en el caso anterior se requiere que sus antenas (generalmente parabólicas<sup>50</sup>) se encuentren alineadas. La atenuación es la principal causa de pérdidas ya que este parámetro se incrementa con el cuadrado de la distancia.

### 2.2.2.3 Satélites

En este caso el satélite (debe ser geoestacionario) ubicado a Kilómetros de la tierra, recibe la señal, la amplifica y la devuelve al lugar que es requerido. Las frecuencias de transmisión y recepción del satélite deben ser de rangos diferentes con el objetivo de evitar interferencias. Se debe tener especial atención al control de flujo y errores de la señal.

---

<sup>45</sup> Mínima separación en frecuencia que deben tener dos señales multiplexadas.

<sup>46</sup> Soporte de transmisión de datos en dos sentidos.

<sup>47</sup> Se hace uso de una fibra óptica por cada sentido de comunicación.

<sup>48</sup> Se hace uso de una única fibra óptica en los dos sentidos de comunicación.

<sup>49</sup> IrDA: The Infrared Data Association – Asociación de Datos infrarrojos

<sup>50</sup> Tipo de antena que lleva un reflector (superficie que refleja luz u otro tipo de onda) parabólico.

### **2.2.3 Técnicas de conmutación**

#### **2.2.3.1 Conmutación de circuitos**

A cada comunicación se le asigna un camino físico exclusivo durante el tiempo que dure la comunicación por lo que son necesarias fases conocidas como establecimiento y liberación de la llamada. Es útil para tráfico que durante un período de tiempo extenso es constante o para el caso de sensibilidad al retardo (como lo es la voz). Dentro de este tipo tenemos:

1. Conmutación en el espacio y tiempo.
2. Técnica de multiplexación TDM.

#### **2.2.3.2 Conmutación de mensajes**

En este caso los nodos que forman parte de la red funcionan en modo almacenamiento y envío, el proceso es como sigue (ejemplo 3 nodos):

El Nodo inicial envía el mensaje, el siguiente nodo recibe el mensaje, lo procesa y a continuación lo envía al siguiente nodo. En este proceso existen retardos de propagación, almacenamiento, procesamiento y colas por lo que el retardo es variable y elevado. No es útil para tráfico interactivo pero hace uso eficiente de los enlaces ya que el mensaje ocupa todo el ancho de banda del enlace entre nodo y nodo.

#### **2.2.3.3 Conmutación de paquetes**

En este caso los datos de los usuarios se fragmentan en datos más pequeños y de longitud fija – llamados paquetes o celdas-, esto permite que los nuevos datos sean enviados sin la necesidad de que el mensaje completo sea recibido. Los paquetes son enviados secuencialmente sin la espera de una confirmación de recepción correcta para el envío del siguiente paquete. Es útil para aplicaciones como: consultas de bases de datos, acceso a Internet, voz sobre IP.

Cabe indicar que si se requiere una fiabilidad completa de la información, mecanismos de control deben ser implementados.

## 2.3 Tecnologías de Transmisión en Redes de proveedores de servicios

### 2.3.1 Sistema PCM30

PCM<sup>51</sup> es el inicio del cambio de tecnología analógica a digital, el sistema PCM30 puede transmitir de forma simultánea 30 señales de diversas características, esto lo lleva a cabo mediante la transformación de las mismas en canales de 64 Kbps que luego con una combinación a partir de multiplexación en tiempo llega a 2048 Kbps.

### 2.3.2 Jerarquía Digital Plesiócrona<sup>52</sup> (PDH<sup>53</sup>)

PDH surge con la finalidad de superar el inconveniente de la combinación de información que proviene de múltiples usuarios. Consiste en la multiplexación sucesiva de señales que provienen de fuentes distintas de forma tal que se puede formar una señal común con un bit rate superior. Realizando varias multiplexaciones se logran las jerarquías propias de PDH.

A continuación los estándares utilizados:

Europa		USA		Japón	
E1	2.048 Mbps	T1	1.544 Mbps	J1	1.544 Mbps
E2	8.448 Mbps	T2	6.312 Mbps	J2	6.312 Mbps
E3	34.368 Mbps	T3	44.736 Mbps	J3	32.064 Mbps
E4	139.264 Mbps	T4	274.176 Mbps	J4	97.728 Mbps

*Tabla 1. Estándares PDH.*

*Fuente: El Autor.*

Para llegar a estas velocidades en el caso del estándar Europeo el proceso es en base de multiplexaciones, las que se llevan a cabo tomando 4 líneas de la jerarquía inmediatamente inferior, y multiplexándolas en tiempo se alcanzan la siguiente jerarquía.

---

<sup>51</sup> PCM: Pulse Code Modulation

<sup>52</sup> Quiere decir: casi igual.

<sup>53</sup> PDH: Plesiochronous Digital Hierarchy

### 2.3.3 Jerarquía Digital Síncrona (SDH)

Se trata de una red de transporte digital que lleva información de todo tipo, además de ofrecer un gran ancho de banda la transmisión digital síncrona simplifica los mecanismos de acceso, gestión y mantenimiento.

Apareció como solución a los inconvenientes de PDH ya que ésta en sus inicios apareció para satisfacer la demanda de tráfico de voz y siendo que no cuenta con modificaciones resulta inadecuada para el transporte de señales de banda ancha.

Esta Jerarquía define interfaces que son independientes del fabricante, la unidad mínima es 155,52 Mbps o STM-1. A partir de esta unidad se definen las de orden superior cuyo resultado se obtiene de la multiplexación  $n \times 4$  de la interfaz fundamental (ver Tabla 2.).

<b>SONET Optical Carrier Level</b>	<b>SONET Formato de trama</b>	<b>SDH Nivel y formato de trama</b>	<b>Velocidad de línea (Mbps)</b>
OC-3	STS-3	STM-1	155,52
OC-12	STS-12	STM-4	622,08
OC-48	STS-48	STM-16	2488,32
OC-192	STS-192	STM-64	9.953,28
OC-768	STS-768	STM-256	39.813,12

*Tabla 2. Interfaces de la Jerarquía Digital Síncrona (SDH) y la analogía con SONET.*

*Fuente: El autor.*

<b>Ventajas de SDH</b>	
Simplificación en la infraestructura de red	Multiplexor síncrono puede realizar las operaciones de varios PDHs.
	<p>Reducción de costos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilización de menos equipos.</li> <li>2. Equipos ocupan menos espacio.</li> <li>3. Menor necesidad de repuestos.</li> <li>4. Mantenimiento más simple.</li> <li>5. Menor consumo de energía.</li> </ol>
	Mayor fiabilidad de la red y rapidez para atender requerimientos.
	Mezcla de diferentes señales en la misma trama básica.
Disponibilidad	Monitoreo y mantenimiento de la Red. Transmite información OAM (Operación, Administración y Mantenimiento).
Gestión vía software	Control de la red vía software de gestión.
	Gestión remota de cada elemento que forma parte de la red, lo que permite detección rápida de falla, errores y prueba de calidad de las conexiones.
Flexibilidad	Compatibilidad entre jerarquías síncronas y plesiócronas.
	Capacidades son asignadas en base a requerimientos de clientes y servicios.
Estandarización	Se da la posibilidad de transmisión simultánea de diversos tipos de señales sin tener que realizar cambios en equipos de transmisión.
	Estándar mundial que tiene la facultad de transmitir distintas fuentes a través de la misma red.
Costes	Precios reducidos ya que las interfaces de conexión a redes síncronas están normadas y definidas (no se requiere de adaptaciones).
	Transmisión de manera simultánea de muchos canales por una única fibra. Ahorro al aumentar el alcance de la señal y por lo tanto se reduce el número de regeneradores intermedios.

*Tabla 3. Ventajas de SDH.*

*Fuente: El autor.*

### 2.3.3.1 Trama

Cada trama STM-1 tiene duración de 125  $\mu$ s y comprende un arreglo matricial de 270 columnas por 9 filas de 1 byte de longitud de 8 bits por cada posición (ver Figura 5.). Este arreglo se encuentra dividido en tres áreas principales:

1. Section<sup>54</sup> Overhead (SOH<sup>55</sup>): de las 270 columnas las 9 primeras corresponden a esta sección y se denomina tara de sección. Las funciones son las de alineación de trama, operación, monitoreo, etc. Esta sección se divide en la tara de sección de regeneración (RSOH<sup>56</sup>) y la tara de sección de multiplexación (MSOH<sup>57</sup>).
2. Punteros de Unidad Administrativa (AU<sup>58</sup>).

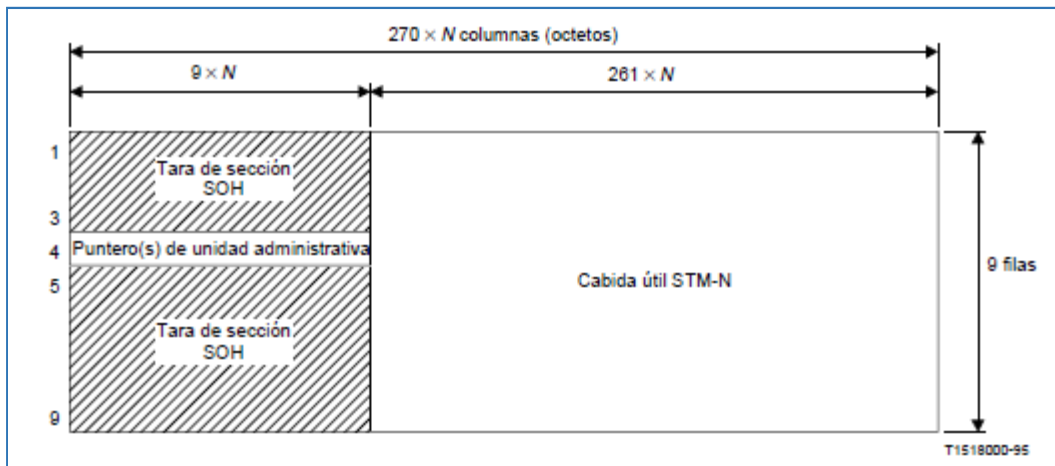


Figura 5. Estructura de trama del STM-N.

Fuente: Recomendación UIT-T G.707.

<sup>54</sup> Section: Son conexiones entre dos elementos vecinos del mismo tipo.

<sup>55</sup> SOH: Section Overhead – Matriz de 9x9 bytes.

<sup>56</sup> RSOH: Regeneration SOH – Sección de regeneración de la SOH.

<sup>57</sup> MSOH: Multiplex SOH – Sección de multiplexación de la SOH.

<sup>58</sup> AU: Administrative Unit - son slots dentro de la trama STM-N con posición fija para transportar tráfico SDH (VC-4 y VC-3)



3. Payload que comprende un único Grupo de Unidad Administrativa (AUG<sup>59</sup>). Comprende el resto de columnas libres, el inicio de la carga útil en la trama está determinado por el puntero de trama el cual indica la ubicación de los VC<sup>60</sup> en una AU o TU<sup>61</sup>.

La transmisión de la trama SDH es realizada en serie, fila por fila. Si se pudiese identificar los bytes específicos, se vería 9 bytes de overhead, seguido de 261 bytes de payload repetidos 9 veces por trama.

### 2.3.3.2 Estructura de Multiplexación

La estructura de multiplexación se encuentra definida en la Recomendación UIT-T G.707 (ver Figura 6.).

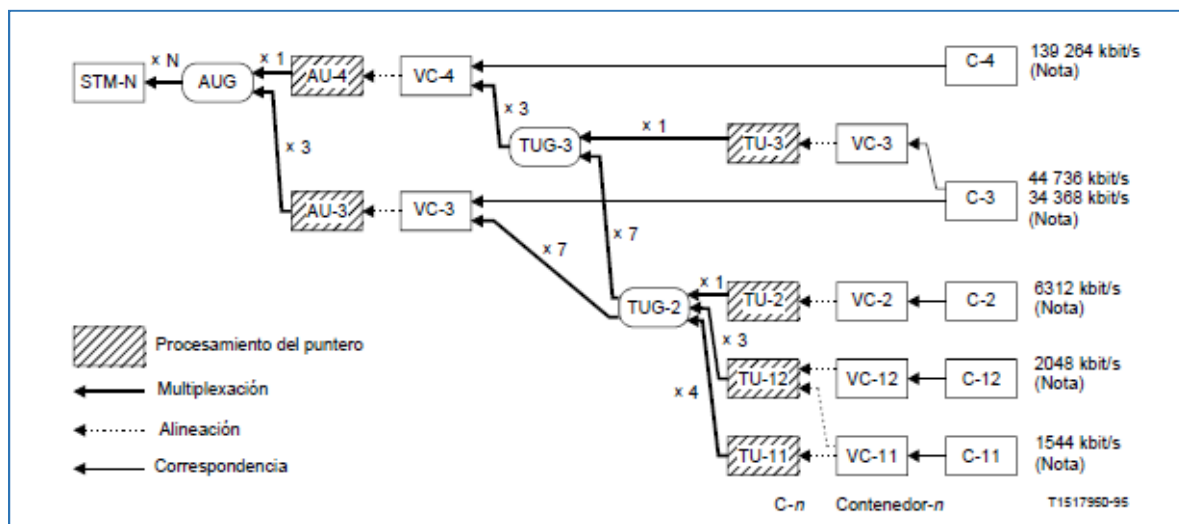


Figura 6. Estructura de Multiplexación STM-N.

Fuente: Recomendación UIT-T G.707.

Las señales PDH son encapsuladas en elementos denominados contenedores (C<sup>62</sup>) y dependiendo de la señal PDH que encapsulen se les otorga un orden u otro (C-n).

<sup>59</sup> AUG: Administrative Unit Group – Concatenación por bytes de las AU.

<sup>60</sup> VC: Virtual Container - recipientes utilizados para transmisión de extremo a extremo que se transmiten de forma transparente entre sistemas de transportes por una red SDH.

<sup>61</sup> TU: Tributary Unit – son slots dentro de la trama STM-N con posición fija para transportar tráfico SDH (VC-11, VC-12, VC-2 y VC-3)

<sup>62</sup> C: Container

Luego estos contenedores junto con información de control se agrupan en unidades de mayor nivel llamadas contenedores virtuales (VC). La información de control (POH<sup>63</sup>) se utiliza para monitoreo de la calidad del servicio y para indicar el tipo de contenedor utilizado. Los contenedores virtuales representan la carga útil.

El proceso siguiente es la adición de los punteros, estos indican la posición del VC al cual está asociado. Este conjunto de VC y puntero se conoce como AU o bien TU. Las TU se multiplexan a nivel de byte y se forma lo que se conoce como TUG<sup>64</sup>, lo mismo ocurre con las AU formando un AUG. Para concluir se añade la tara se sección formándose el STM-N.

### 2.3.3.3 Taras

Es la información de control en la jerarquía SDH, utilizada para monitoreo, detección de errores, facilitar canales de monitoreo, etc. Se debe distinguir entre trayecto y otros tipos de secciones. Trayecto se conoce al tramo de red que se encuentra entre dos puntos de inserción/extracción de VCs. Por lo que la tara de trayecto (POH) es asignada al VC durante la multiplexación y continúa con él hasta la demultiplexación.

Un trayecto se divide en secciones, cada sección mantiene íntegra la señal STM-N (no se inserta ni se extrae información). Si la sección se encuentra entre dos regeneradores se la conoce o se la denomina sección de regeneración si por el contrario se encuentra entre dos multiplexores se la denomina sección de multiplexación.

### 2.3.3.4 Arquitectura

Según la recomendación UIT-T G.782 / G783 la red SDH se encuentra formada por las siguientes categorías de equipos:

1. Regeneradores Intermedios (IR<sup>65</sup>): Compensan los efectos de la atenuación y dispersión de la fibra en la señal óptica. Regeneran la señal de reloj en base al flujo de bits entrante.
2. Multiplexores Terminales (TMX<sup>66</sup>): Sus funciones son de interfaz, ensamblado y desensamblado, generando el STM-N a partir de señales ya sean plesiócronas o síncronas.
3. Multiplexores de inserción /extracción (ADM): Insertan y extraen tributarios.

---

<sup>63</sup> POH: Path OverHead

<sup>64</sup> TUG: Tributary Units Group

<sup>65</sup> IR: Intermediate Regenerator

<sup>66</sup> TMX: Terminal Multiplexer

4. Distribuidores multiplexores (DXC<sup>67</sup>): Realizan la interconexión de señales y la conexión del tráfico entre nodos pertenecientes a la red.

#### 2.3.3.5 Topologías

La configuración de más utilización es el anillo SDH aunque soporta configuraciones en malla y estrella. Adicionalmente, SDH cuenta con mecanismos o esquemas de protección que ayudan al incremento de la disponibilidad de red y facultan la respuesta efectiva frente a daños de forma dinámica:

1. Esquema de protección 1+1: en este esquema la señal o información se envía por dos caminos de forma paralela. En caso de presentarse falla en el camino principal, el receptor recibe la información del camino secundario en un tiempo alrededor de 50 ms.
2. Esquema de protección 1:n ( $n \geq 1$ ): en este esquema la señal o información se envía por el camino de protección únicamente si existiese falla en el camino principal.

#### 2.3.3.6 Sincronización

Se debe utilizar o hacer uso de una misma frecuencia de reloj en todos los elementos de la red en una red síncrona, aquí se requiere que todos los relojes de todos los elementos de red se sincronicen a un PRC<sup>68</sup> (ITU-T G803) que cumpla con la recomendación ITU-T G.811 (la exactitud a largo plazo del PRC debe perdurar en 1 parte en  $10^{11}$  verificada con el UTC<sup>69</sup>). La distribución de la señal de reloj primaria se encuentra en las recomendaciones ITU-T G.812

La distribución entre estaciones encaja en una topología de árbol que permite la sincronización de las estaciones en la red (ver Figura 7). En esta arquitectura es importante:

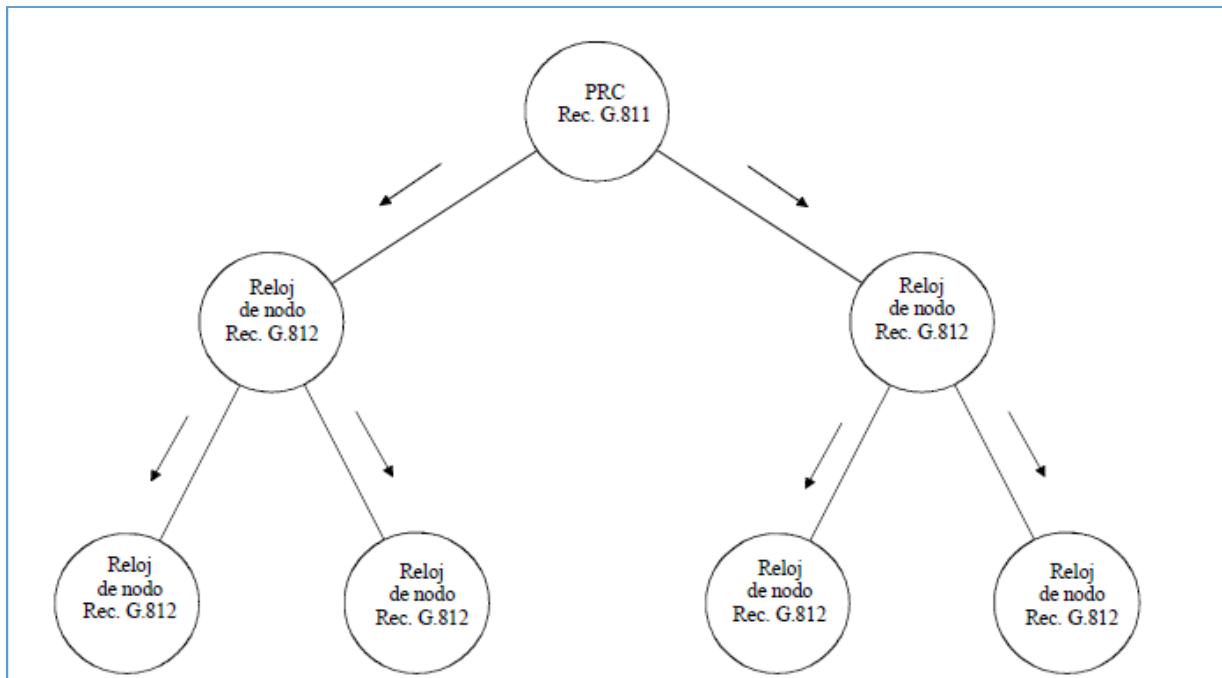
1. Relojes de nivel jerárquico inferior que acepten señales de temporización de nivel jerárquico superior o igual.
2. Se eviten loops de reloj (temporización).

---

<sup>67</sup> DXC: Digital Cross-Connect

<sup>68</sup> PRC: Primary Reference Clock

<sup>69</sup> UTC: Universal Time Coordinated



*Figura 7. Distribución intranodal en la arquitectura de la red de sincronización.*

*Fuente: Recomendación UIT-T G.803.*

#### 2.3.4 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

La aparición de DWDM es uno de los fenómenos más importantes en el desarrollo de la tecnología de transmisión por fibra óptica. WDM comenzó a finales de 1980 utilizando longitudes de onda en las bandas de 1310 nm y 1550 nm (o 850 nm y 1310 nm) - WDM de banda ancha.

La década de 1990 vio una segunda generación de WDM - WDM de banda estrecha, en el que se utilizaron dos a ocho canales. Estos canales estaban separados en un intervalo de alrededor de 400 GHz en la ventana de 1550 nm.

A mediados de la década de 1990, los sistemas densos WDM aparecen con 16 a 40 canales y espaciamiento de 100 a 200 GHz. A finales de 1990 los sistemas son capaces de emplear 64 a 160 canales, separados a 50 o incluso intervalos de 25 GHz.

Las siguientes ventanas de operación han sido utilizadas en transmisión óptica:

1. La primera ventana a 850 nm.
2. La segunda ventana a 1300 nm.
3. La tercera ventana a 1550 nm.

4. La cuarta ventana a 1600 nm.

De acuerdo a la mínima absorción, la tercera ventana es la más adecuada para la tecnología DWDM. Para estos sistemas se han definido tres bandas ópticas:

1. La banda S (Short): 1460 a 1530 nm.
2. La banda C (Conventional): 1530 a 1565 nm.
3. La banda L (Long): 1565 a 1625 nm.

Las vibraciones de luz se las prefiere representar ya sea por sus longitudes de onda o de acuerdo a sus frecuencias, para realizar esa conversión hacemos uso de la ecuación:

$$frecuencia = \frac{velocidad\ de\ la\ luz\ en\ el\ vacío}{longitud\ de\ la\ onda} = \frac{c}{\lambda} [Hz]$$

Donde  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s

En la Recomendación UIT-T G.694.1 se define un plan de frecuencias para soportar aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda densa. DWDM tiene un espaciamiento de canal menor o igual a 1000 GHz (ver Figura 8).

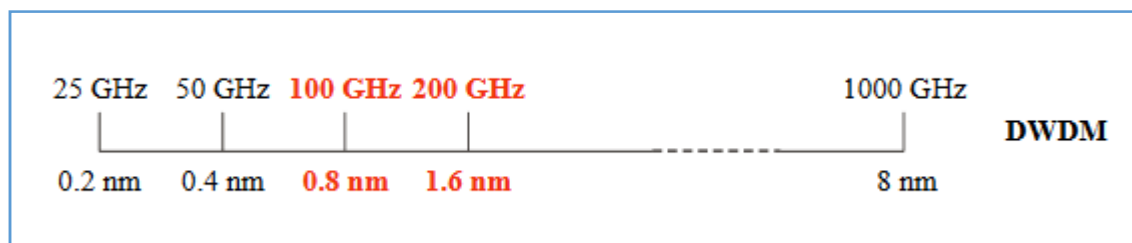


Figura 8. Sistema DWDM.

Fuente: ITU-T Manual - Optical, fibers, cables and systems.

Esta recomendación define cuatro planes de frecuencia específicos: espaciamiento de 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz y 100 GHz. Todos los cuatro planes de frecuencia incluyen 193,1 THz (1552,52 nm) como uno de sus miembros.

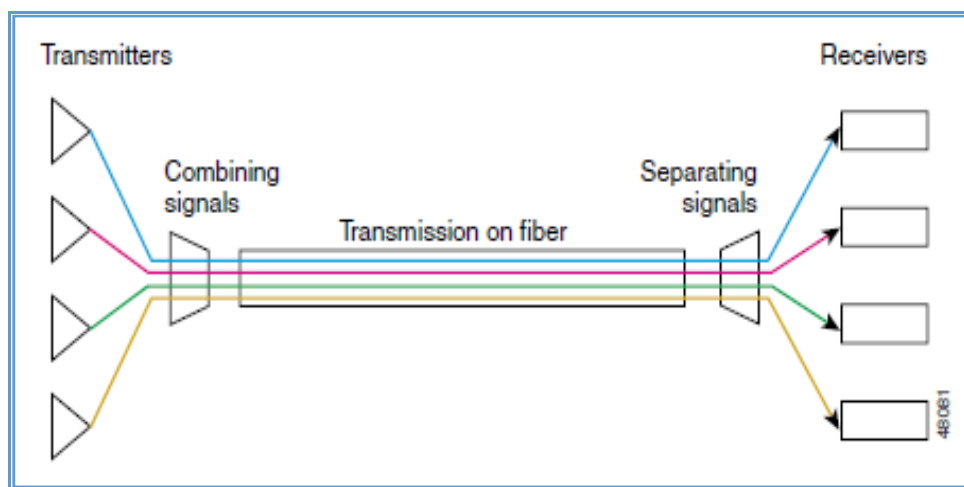
Banda C (Conventional): 1530 a 1565 nm				
Ancho espectral: 35 nm				
f ( $\lambda$ )	12,5 GHz (0,1 nm)	25 GHz (0,2 nm)	50 GHz (0,4 nm)	100 GHz (0,8 nm)
# de canales	350	175	$\approx 88$	$\approx 44$

*Tabla 4. Número de canales para cada espaciamento definido en la recomendación ITU-T G.694.1.*

*Fuente: El autor.*

#### 2.3.4.1 Funciones del Sistema DWDM

En su esencia, DWDM implica un pequeño número de funciones de capa física. Esto se describe en la Figura 9, la cual expone un esquema de cuatro canales. Cada canal óptico ocupa su propia longitud de onda<sup>70</sup>.



*Figura 9. Esquema Funcional DWDM.*

*Fuente: Introduction to DWDM Technology – Cisco Systems.*

<sup>70</sup> Longitud de onda es expresada usualmente en nanómetros.

El Sistema lleva a cabo las siguientes funciones principales:

1. **Generación:** Un láser de estado sólido (fuente), debe proveer luz estable dentro de un determinado ancho de banda angosto la cual lleva los datos digitales modulados como una señal analógica.
2. **Combinación:** Sistemas DWDM modernos hacen uso de multiplexores para acoplar las señales. Se presenta una cierta pérdida asociada a la multiplexación y demultiplexación, la cual depende de la cantidad de canales, pero puede ser disminuida mediante el uso de amplificadores ópticos, los cuáles potencian todas las longitudes ópticas sin la necesidad de conversión eléctrica.
3. **Transmisión:** Los efectos de la diafonía y degradación deben tomarse en cuenta en la transmisión via fibra óptica. Dichos efectos pueden minimizarse mediante variables de control como: espaciamiento de canales, tolerancia de longitud de onda y niveles de potencia del láser. En un enlace la señal óptica podría tener la necesidad de ser amplificada.
4. **Separación:** En el extremo receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta función parecería ser solo lo opuesto de la combinación, en realidad es más complicado.
5. **Recepción:** La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector.

Un sistema DWDM además debe contar con interfaces de usuario para recibir las señales de entrada. Dicha función es efectuada por los transponders.

#### 2.3.4.2 Componentes y Operación

DWDM es una tecnología core en una red de transporte óptico cuyos componentes se pueden clasificar como sigue:

1. **Lado transmisor:** Láseres con longitudes de onda precisa y estable.
2. **En el enlace:** fibra óptica que muestre baja pérdida y desempeño en el correspondiente espectro de longitud de onda, además de amplificadores de ganancia plana para potenciar la señal en tramos extensos.

3. Lado receptor: Fotodetectores y demultiplexores ópticos que utilizan filtros de capa fina o elementos de difracción.
4. Multiplexores ópticos add/drop y componentes ópticos cross-connect.

#### 2.3.4.3 Fibra Optica

Tres tipos de fibra óptica son utilizadas en DWDM cuyas recomendaciones se encuentran en ITU-T G.652, ITU-T G.653 e ITU-T G.65X.

ITU-T G.652. Describe una fibra óptica monomodo estándar (SSMF<sup>71</sup>) cuyo diseño ha sido optimizado para su trabajo en la ventana de 1310 nm con dispersión nula a 1324 nm, pero puede utilizarse en la región de 1550 nm si se emplean técnicas para compensar la dispersión cromática<sup>72</sup>. Es la fibra óptica más comercializada.

ITU-T G.653. Describe una fibra óptica monomodo de dispersión desplazada (DSF<sup>73</sup>), cuyo diseño ha sido optimizado para su trabajo en la ventana de 1550 nm donde se presenta dispersión nula. Sin embargo, la limitante es el aumento del fenómeno conocido como FWM<sup>74</sup>, es un factor muy importante que debe ser tomado en cuenta para evaluar en la decisión de empleo de una fibra óptica.

ITU-T G.65X. El diseño de estas fibras supera el fenómeno FWM pero con el tema que admiten un valor de dispersión mayor. Estas son el medio más idóneo para redes DWDM.

#### 2.3.4.4 Efectos no lineales en la fibra óptica

Las no linealidades están relacionada a:

1. Variación en el índice: SMP<sup>75</sup>, XMP<sup>76</sup> y FWM<sup>77</sup>.
2. Efectos scattering: SBS<sup>78</sup> y SRS<sup>79</sup>.

---

<sup>71</sup> SSMF: Standard Single Mode Fiber.

<sup>72</sup> Se refiere al retardo (deformación) espectral de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra.

<sup>73</sup> DSF: Dispersion Shifted Fiber.

<sup>74</sup> FWM (Four Wave Mixing): Se produce cuando dos o más señales ópticas de diferentes longitudes de onda un equipo no lineal origina dos longitudes de onda adicionales efecto de la suma y resta respectivamente de las longitudes originales.

<sup>75</sup> SMP (Self-Phase Modulation)

<sup>76</sup> XMP (Cross-Phase Modulation)

<sup>77</sup> FWM (Four-Wave Mixing)

<sup>78</sup> SBS (Stimulated Brillouin scattering)

<sup>79</sup> SRS (Stimulated Raman scattering)

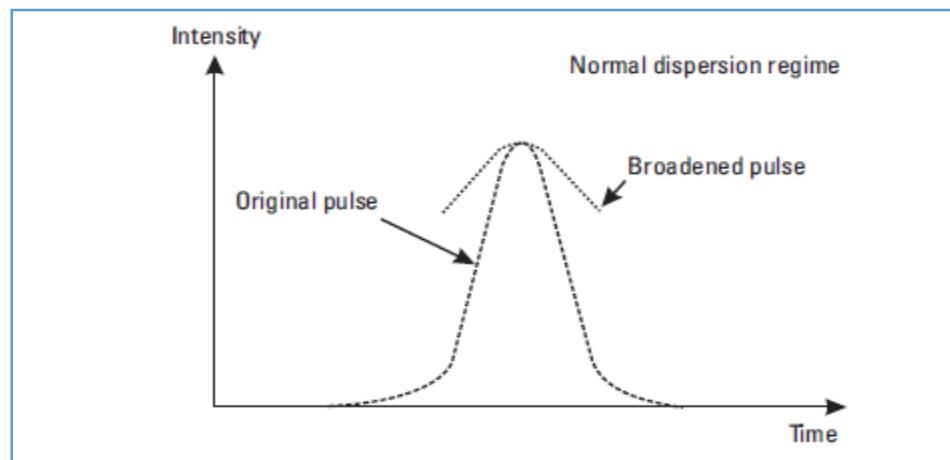


Estos efectos no lineales localmente son pequeños pero llegan a ser importantes por la acumulación de los mismos a lo largo del trayecto de la fibra, generalmente degradan la calidad de la transmisión.

#### 2.3.4.4.1 Modulación de fase inducida (SPM)

En los sistemas long-haul se requieren altas potencias para alcanzar un razonable espaciado óptico del amplificador a alta velocidad de bits. Variaciones del índice, producidas por el intenso campo eléctrico de las señales de luz, origina el efecto Kerr<sup>80</sup> y por lo tanto cambios en la fase de la señal.

Esta variación del índice modula la fase de la señal, lo cual modifica el espectro de la señal. El pulso es ensanchado por SPM con una dispersión negativa (régimen de dispersión normal) y acortado por SPM con una dispersión positiva (ver Figura 10).



*Figura 10. Pulso ensanchado por SPM en una fibra de dispersión negativa.*

*Fuente: DWDM Fundamentals, Components and applications – Jean-Pierre Laude.*

SPM limita la longitud máxima del enlace de alta velocidad de bit. Para un ancho de banda y distancia dadas, la relación señal ruido óptica (OSNR<sup>81</sup>) puede siempre incrementarse con más emisión de potencia pero solo hasta el punto donde la no linealidad de la fibra empieza a penalizar la señal.

<sup>80</sup> Efecto Kerr: es un fenómeno en el que casi todas las sustancias transparentes isotrópicas sometidas a un campo eléctrico sufren una variación de las propiedades ópticas (cambio en el índice no lineal de la fibra) y presentan el fenómeno de la birrefracción.

<sup>81</sup> OSNR (Optical signal-to-noise ratio): Muestra la relación de la potencia de la señal con el ruido que está con la señal.

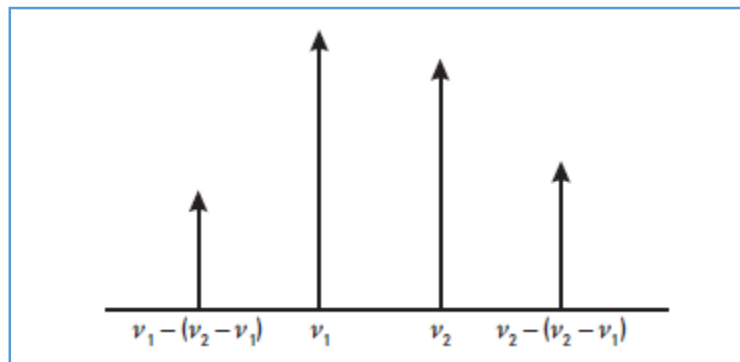
#### 2.3.4.4.2 Modulación Cruzada de Fase (XMP)

Se manifiesta al momento que dos o más canales son transmitidos de manera simultánea a través de la fibra óptica en sistemas WDM, esto debido a que el índice de refracción efectivo para una onda incidente no depende únicamente de la energía de esa onda sino también de la energía de otras ondas que se propaguen en el canal.

#### 2.3.4.4.3 Mezcla de cuatro longitudes de onda (FWM)

Tres señales de frecuencia  $\nu_i$ ,  $\nu_j$ ,  $\nu_k$  estrechamente separadas pueden generar un producto mezcla en una cuarta frecuencia  $\nu_i + \nu_j - \nu_k$ . Este efecto es llamado mezcla de cuatro longitudes de onda.

En principio, FWM puede ser originada por la mezcla de sólo dos frecuencias. Dos señales en frecuencias  $\nu_i$  y  $\nu_j$  generan armónicos a frecuencias  $\nu_i - (\nu_j - \nu_i)$  y  $\nu_j + (\nu_j - \nu_i)$  (ver Figura 11). Estos armónicos llevan ruido adicional que fuese particularmente dañino si estos aterrizasen en otros canales WDM adyacentes. A partir de  $N$  longitudes de onda originales se crean  $N^2(N-1)/2$  nuevas longitudes de onda.



*Figura 11. Señales a frecuencias  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  y sus armónicos FWM.*

*Fuente: DWDM Fundamentals, Components and applications – Jean-Pierre Laude.*

#### 2.3.4.4.4 Dispersión estimulada de Raman (SRS)

La Dispersión estimulada de Raman ocasiona que los canales de mayor frecuencia transfieran energía a los canales de menor frecuencia, este fenómeno ocurre en la dirección de propagación (es un fenómeno de banda ancha). La potencia límite debido a este efecto no lineal se da cuando la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales.

#### 2.3.4.4.5 Dispersión estimulada de Brillouin (SBS)

SBS corresponde a la interacción de las ondas ópticas con las ondas acústicas que ocurren en una fibra. Tiene lugar una dispersión contradiereccional a frecuencias más pequeñas que la frecuencia incidente. El umbral de este efecto no lineal depende del ancho del espectro de la fuente y de la densidad de potencia de la fibra.

La limitación de la emisión de la potencia de la fibra a causa de SBS no depende del número de canales y es más de unos pocos dBm en aplicaciones típicas.

#### 2.3.4.5 Codificación

Los tipos de codificación que se emplean para el dominio óptico son: no retorno a cero (NRZ<sup>82</sup>) y retorno a cero (RZ<sup>83</sup>) (ver Figura 12.).

En el formato RZ, cada pulso que representa el bit 1 es más corta que el slot de bit, y su amplitud vuelve a cero antes de que la duración del bit termine.

En el formato NRZ, el pulso permanece en a lo largo del slot de bit y su amplitud no cae a cero entre dos o más bits 1 sucesivos. Como resultado, la anchura del pulso varía dependiendo del patrón de bits, mientras que sigue siendo la misma en el caso de formato RZ.

---

<sup>82</sup> NRZ (Nonreturn-to-zero)

<sup>83</sup> RZ (Return-to-zero)

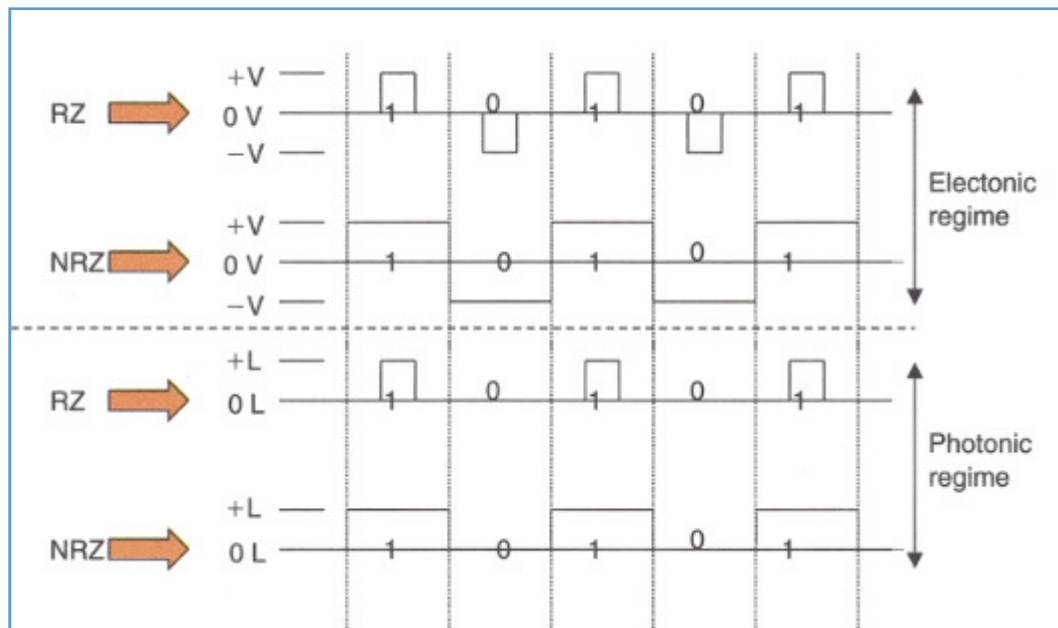


Figura 12. Codificación RZ y NRZ.

Fuente: *DWDM Fundamentals, Components and applications* – Jean-Pierre Laude.

#### 2.3.4.6 Emisores y Detectores de Luz

Estos dispositivos activos se ubican en los extremos del sistema de transmisión óptica. Los emisores de luz se encuentran del lado transmisor y se encargan de la conversión de las señales eléctricas a pulsos de luz. Los detectores de luz ubicados del lado receptor se ocupan de la conversión de pulsos de luz en señales eléctricas.

El emisor de luz utilizado en el diseño de un sistema es de importante consideración ya que puede ser uno de los elementos más costosos. En transmisión óptica dos tipos de emisores de luz son utilizados:

1. Diodos emisores de luz (LEDs): Son relativamente lentos, en general para velocidades menores a 1 Gbps. Cuentan con un ancho espectral relativamente amplio y con emisión de luz en un cono amplio. Se los utiliza usualmente en transmisiones con fibra multimodo.
2. Diodos Láser: Son más adecuados para comunicaciones por fibra monomodo, radía luz en una dirección que es enfocada por una lente hacia la fibra y en el otro extremo hacia un fotodiodo. Los requisitos importantes de un láser, como son:

- a. Longitud de onda precisa.
- b. Ancho de espectro angosto.
- c. Suficiente Potencia.
- d. Control de fluctuación<sup>84</sup> (chirp).

Son cubiertos por este tipo de dispositivos excepto el control de fluctuación.

En recepción se hace necesario la recuperación de las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda por la fibra óptica. Ya que los fotodetectores son dispositivos de banda ancha, dichas señales deben ser demultiplexadas antes de llegar al detector.

Existen dos fotodetectores que son utilizados:

1. Fotodiodo PIN<sup>85</sup>: En este caso la luz es más absorbida que radiada y los fotones son transformados en electrones en relación 1:1.
2. Fotodiodo de avalancha (APD<sup>86</sup>): Son similares a los anteriores con la particularidad de que su ganancia se obtiene a través de un procedimiento de amplificación.

Los primeros fotodetectores presentan varias ventajas, que incluyen su bajo costo y confiabilidad, pero los APDs tienen mayor sensibilidad en recepción y mayor precisión.

#### 2.3.4.7 Amplificadores Opticos

A causa de la atenuación, existen límites en la duración en la que un segmento de fibra puede propagar una señal íntegra antes que esta deba ser regenerada. Antes de la invención de los amplificadores ópticos (OAs<sup>87</sup>) un repetidor debía estar presente por cada señal que se transmitía. Este dispositivo ha permitido amplificar todas las longitudes de onda de una sola vez sin tener que efectuar una conversión óptica-eléctrica-óptica.

Los OAs pueden emplearse además para incrementar la potencia de la señal luego de la multiplexación o previa a la demultiplexación.

---

<sup>84</sup> Cambio en la frecuencia de una señal en el tiempo (chirp)

<sup>85</sup> PIN: Positive-intrinsic-negative

<sup>86</sup> APD: Avalanche photodiode

<sup>87</sup> OA: Optical Amplifier

#### 2.3.4.7.1 Amplificador dopado de Erblio (EDFA<sup>88</sup>)

EDFA es muy importante para que DWDM sea capaz de transmitir grandes cargas a grandes distancias. Esto ha sido una fuerza conductora en el desarrollo de otros elementos de red y tecnologías.

Erblio es un elemento raro de la tierra que al ser excitado radía luz aproximadamente de 1,54 micrómetros ( $\lambda$  de baja pérdida para fibras ópticas empleadas en DWDM). Si a una fibra dopada de erblio ingresa una señal débil, se inyecta una luz a 980 nm o 1480 nm a través de una bomba láser, esta luz estimula a los átomos de erblio los cuáles expulsan la energía almacenada en forma de luz adicional a 1550 nm.

A medida que sigue este proceso en la fibra, la señal se hace más fuerte. Las radiaciones espontáneas en el EDFA agregan ruido a la señal; esto determina el factor de ruido de un EDFA.

Los parámetros importantes de los OAs son:

1. Ganancia.
2. Nivel de ruido.
3. Potencia de salida.

EDFA típicamente poseen ganancias de 30 dB o superior y una potencia de salida de +17 dB o mayor. La ganancia debería ser plana ya que todas las señales tienen que ser amplificadas de manera uniforme.

Bajo nivel de ruido es un requisito importante ya que el ruido se amplifica al igual que la señal. Este efecto es acumulativo y no puede ser filtrado, por lo que la relación señal a ruido es un factor limitante en el número de amplificadores que pueden ser utilizados lo que está asociado con la longitud de un enlace de fibra.

Entre amplificadores las señales pueden viajar hasta 120 km en la práctica, y estas deben ser regeneradas si las distancias son mayores (600 a 1000 Km). Ya que el OA no realiza las funciones 3R (remodelar, resincronizar, retransmitir). En la tabla 5 se muestra los amplificadores ópticos y las bandas de operación.

---

<sup>88</sup> EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier

EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	1530-1565 nm
GS-EDFA	Gain-Shifted EDFA	1570-1610 nm
EDTFA	Erbium-Doped Tellurite-based Fiber Amplifier	1530-1610 nm
GS-TDFA	Gain-Shifted Thulium-Doped Fiber Amplifier	1490-1530 nm
TDFA	Thulium-Doped Fluoride-based Fiber Amplifier	1450-1490 nm

*Tabla 5. Amplificadores.*

*Fuente: El autor (Transmission Networks WDM technology Fundamentals - Alcatel Lucent).*

#### 2.3.4.7.2 Amplificador Raman

El principio del amplificador Raman es diferente de los amplificadores mostrados en la tabla anterior (Tabla 5.) y es principalmente utilizado en enlaces DWDM sin repetidores. El amplificador utilizado es llamado Raman Fiber Amplifier (RFA) (1420-1620 nm o más).

	Tipo de amplificador		
Parameter	EDFA	RAMAN	SOA
Gain	-30 dB	-20 - 25 dB	-10 - 20 dB
Output Power	High	High	Low
Input Power	Moderate	High	High
Cross Talk	Low	Low	Very High
Gain Tilt	High	Low	High
Appllication	Metro, long Haul	Long haul, ultra long haul	Short haul, single channel

*Tabla 6. Comparación de Amplificadores Opticos.*

*Fuente: El autor (Optical network Design and Implementation Cisco Systems).*

#### 2.3.4.8 Multiplexores y Demultiplexores

En vista que los sistemas DWDM transmiten señales que provienen de varias fuentes en por sola fibra óptica, éstos deben incorporar varios medios para combinar las señales entrantes. Dicha actividad se realiza con un componente llamado Multiplexor, el cual recibe longitudes de onda ópticas de varias fibras y las concentra en un solo haz.

Del otro lado en el extremo receptor, el sistema debe ser capaz de dividir los componentes de la luz de modo que puedan ser detectados con discreción. Los componentes llamados Demultiplexores realizan esta función mediante la separación del haz recibido en sus componentes de longitud de onda y realizando el acoplamiento a las fibras individuales.

La Demultiplexación debe efectuarse antes de que la luz sea detectada, ya que los fotodetectores son dispositivos de banda ancha que no pueden realizar una detección selectiva de una sola longitud de onda.

Para sistemas unidireccionales, existe un multiplexor en el extremo emisor y un demultiplexor en el extremo receptor, por lo que sería necesario un sistema de dos equipos en cada extremo para la comunicación bidireccional, y se necesitaría dos fibras separadas.

Para un sistema bidireccional, existe una pareja multiplexor-demultiplexor en cada extremo del enlace y la comunicación se efectúa sobre un único par de fibras.

Los equipos Multiplexores y Demultiplexores podrían ser elementos pasivos o activos en el diseño. Los retos principales en estos dispositivos son:

1. Reducir al mínimo la diafonía<sup>89</sup>
2. Incrementar la separación de canales<sup>90</sup>.

#### 2.3.4.9 Multiplexores Opticos Add/Drop

En ciertos casos es necesario eliminar o añadir una o más longitudes de onda en un determinado lugar a lo largo del enlace de fibra óptica. Esta función es realizada por un elemento llamado Multiplexor de inserción / extracción óptico (OADM). En lugar de eliminar o añadir todas las longitudes de onda, el OADM puede eliminar varias, mientras permite el paso de otras. Cabe indicar que estos elementos no realizan conversión de la señal óptica a eléctrica.

Existen dos tipos de OADMs:

1. Dispositivo fijo, el cual es configurado físicamente para eliminar longitudes de onda específicas (predeterminadas) entretanto que otras se añaden.
2. Dispositivo reconfigurable, capaz de escoger de manera dinámica las señales que se añaden y/o se eliminan.

---

<sup>89</sup> Diafonía: Es una medida de lo bien que se separan los canales.

<sup>90</sup> Se refiere a la capacidad de distinguir cada longitud de onda.



#### 2.3.4.10 Interfaces para DWDM

Los sistemas DWDM soportan en su mayoría los estándares SONET o SDH para interfaces ópticas de corto alcance. En sistemas WDM de largo alcance, se utilizan usualmente interfaces OC-48c o STM-16c que operan a la longitud de onda de 1310 nm.

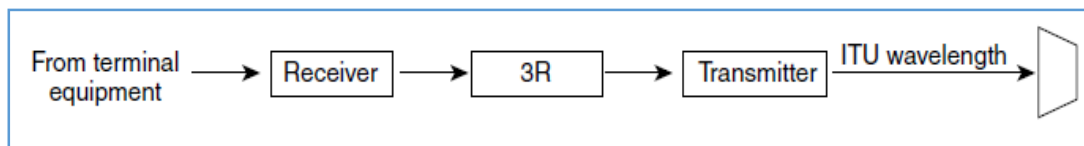
Otras interfaces importantes en las redes de área metropolitanas y de acceso son: Ethernet, ESCON y Fiber Channel.

#### 2.3.4.11 Transponder

En un sistema DWDM un transponder:

1. Transforma la señal óptica de un cliente a una señal eléctrica.
2. Lleva a cabo las funciones 3R (ver Figura 13.).
3. Luego esta señal eléctrica se la convierte a una longitud de onda.

A continuación las longitudes de onda de los transpondedores son multiplexadas ópticamente.



*Figura 13. Funciones del Transponder.*

*Fuente: Introduction to DWDM Technology – Cisco Systems.*

En recepción, se lleva a cabo el procedimiento inverso:

1. Se filtran las longitudes de onda individuales.
2. Las longitudes de onda se las pasa a transponders individuales.
3. Convierten la señal óptica a eléctrica para llevarla a una interfaz estándar para el cliente.

### 3 CAPÍTULO 3. ANALISIS TÉCNICO ECONÓMICO.

#### 3.1 Análisis técnico-económico de la factibilidad del proyecto

##### 3.1.1 Estado actual

La parte de la red actual de la empresa proveedora está constituida por tres Nodos cuya conexión es de 2 anillos de 10 Gbps SDH. Las capacidades de transmisión se encuentran desde un E1 (2,048 Mbps) hasta un STM-64 (10 Gbps).

La fibra óptica instalada corresponde a la de la categoría G.652.D (conocida como SMF standard). Tiene una estructura tipo escalón y está diseñada para aplicaciones que trabajen en la segunda y tercera ventana (1310 y 1550 nm). En la recomendación ITU-T G.652 se presentan los parámetros para este tipo de cable de fibra (un resumen se encuentra en la tabla 7).

Atributos de la Fibra		
Atributo	Dato	valor
Coeficiente de atenuación	Máximo de 1310 nm a 1625 nm	0,4 dB/Km
	Máximo a 1550 nm	0,3 db/Km
Dispersión cromática típica	1550 nm	17 ps/nm*Km
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm
Diámetro del revestimiento	Nominal	125,0 $\mu$ m
	Tolerancia	$\pm 1$ $\mu$ m

*Tabla 7. Atributos G.652.D.*

*Fuente: UIT-T G.652 (06/2005).*

La demanda de tráfico y capacidad han desembocado en la necesidad de ubicar equipos cuya tecnología soporten altas capacidades para proveer servicios Ethernet así como la integración de las conexiones de red SDH de los nodos hacia este nuevo esquema de red de alta capacidad. Con esta solución se podría ofrecer capacidades de transmisión de hasta 100 Gbps.

La red SDH utiliza una solución en anillo que emplea dos hilos de fibra (uno para transmisión y otro para recepción) cuyos equipos principales poseen agregados, STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, y con red de acceso cuyos equipos contienen tributarios E1, DS3, conexiones LAN (10, 100 Mbps).

Con el objetivo de integrar la conexión SDH hacia la nueva red, los equipos se encontrarán en las mismas ubicaciones en las cuáles existen equipos SDH. En la tabla 8 se encuentran los enlaces y distancias entre los distintos Nodos que conforman la nueva Red.

Segmento	Longitud de la F.O. (Km)
Nodo principal - Nodo secundario1	11.3
Nodo secundario 1 - Nodo secundario 2	24.9
Nodo secundario 2 - Nodo principal	22.10

*Tabla 8. Distancias entre Nodos – Red Propuesta.*

*Fuente: El autor.*

La capacidad de la red SDH está casi al borde de saturación y mucho más ante el surgimiento de nuevos clientes que solicitan capacidades de hasta 10 Gbps.

### 3.1.2 Proyección de tráfico

En la tabla 9 se muestra un resumen de las capacidades de los últimos 3 años y que revelan la necesidad de implementar una red de alta capacidad y que permita una cobertura adecuada ante eventuales requerimientos de clientes.

Años	Consumo de Ancho de Banda	Límite de capacidad	índice de crecimiento
2014	9600 Mbps	20 Gbps	
2015	10100 Mbps	20 Gbps	5,21%
2016	19100 Mbps	20 Gbps	89,11%

*Tabla 9. Consumo de Ancho de Banda desde 2014 a 2016.*

*Fuente: El autor.*

Con la información detalla en la tabla 9 se puede realizar la estimación de la tasa de crecimiento en unos 5 años.

$$C_{final} = C_{inicial} (1 + x)^n \quad (3.1)$$

Donde:

$C_{final}$  = Capacidad al final de n años

$C_{inicial}$  = Capacidad inicial

x = Índice de crecimiento anual en servicio de telecomunicaciones

n = Tiempo en años

Despejando x de la ecuación (3.1), tenemos que:

$$x = \left( \frac{C_{final}}{C_{inicial}} \right)^{1/2} - 1 \quad (3.2)$$

Reemplazando los valores de la tabla 8 en la ecuación (3.2):

$$x = \left( \frac{19100}{9600} \right)^{1/2} - 1$$

$$x = 0,410525907$$

Por lo que el índice de crecimiento por año sería de 41.052%. La capacidad del sistema es de 4 x 100 Gbps. Podemos entonces realizar el cálculo del tiempo en el cual se saturará el Backbone despejando de la ecuación (3.1):

$$400 \text{ Gbps} = 19,1 \text{ Gbps} (1 + 0,410525907)^n$$

$$20,94240838 = (1,0,410525907)^n$$

$$\log 20,94240838 = \log(1,0,410525907)^n$$

$$1,321026624 = n 0,149381067$$

$$n = 8,843333695$$

Lo que se puede indicar con estos resultados es que si se mantiene el índice de crecimiento de 41.052% por año, en el tiempo de 8,843 años el Backbone se saturaría. Ahora, con los datos obtenidos y tomando como punto de inicio el valor de ancho de banda en el 2016 se calcula la proyección de este valor a cinco años, utilizando nuevamente la ecuación (3.1):

$$C_{final} = 19100 (1 + 0,410525907)^n$$

Con esto se obtienen los siguientes resultados indicados en la tabla 10:

Años	Consumo de Ancho de Banda	Límite de capacidad	índice de crecimiento
2016	19100	400 Gbps	41.052%
2017	26941,04482	400 Gbps	41.052%
2018	38001,04169	400 Gbps	41.052%
2019	53601,45379	400 Gbps	41.052%
2020	75606,23922	400 Gbps	41.052%
2021	106644,5592	400 Gbps	41.052%
2022	150424,9135	400 Gbps	41.052%
2023	212178,2376	400 Gbps	41.052%
2024	299282,901	400 Gbps	41.052%
2025	422146,2854	400 Gbps	41.052%

*Tabla 10. Proyección de ancho de banda de 2016 a 2024*

*Fuente: El autor*

### 3.1.3 Red DWDM

La Red DWDM está compuesta por tres Nodos ROADM, en idéntica configuración y distribución para facilitar la operación y mantenimiento, escalabilidad y manejo de stock de repuestos y/o crecimiento. La solución se da tomando en cuenta los requerimientos de tráfico iniciales y se proyecta para una capacidad final de 40 canales ópticos de 10 Gigas.

### 3.1.4 Análisis económico

El objetivo de este tema es determinar el costo total de inversión para la implementación del sistema y el momento en el que este proyecto comienza a ser rentable y se empieza a recuperarse la inversión.

Los inversionistas deben estar seguros que un proyecto sea rentable y para eso deben fundamentarse en parámetros que lo ayuden a la hora de tomar decisiones.

### 3.1.4.1 Modelo del WACC<sup>91</sup>

Este parámetro se expresa en forma porcentual. Por ejemplo si este valor es del 11%, el significado expresa que una inversión debe ser realizada solo se proyecta un rendimiento mayor a ese valor. La fórmula estándar es:

$$WACC = \%E * K_o + \%D * I * (1 - T) \quad (3.2)$$

Donde:

%E = porción de capital propio

%D = porción de deuda

$$\%E + \%D = 100\% \quad (3.3)$$

$K_o$  = Costo del patrimonio de los accionistas el cual viene dada por la fórmula:

$$K_o = rf + \beta * m + C \quad (3.4)$$

$rf^{92}$  = tasa libre de riesgo = 8%

$\beta^{93}$  = Se va a tomar como referencia un valor de 1,15 (infraestructura de long haul terrestre).

$m^{94}$  = En el caso de proyectos de telecomunicaciones es de 7.0%

C = Tasa de riesgo país, se estima en 8,12%<sup>95</sup>

I = Interés al que se ha contratado la deuda, se estima en 8.71%<sup>96</sup>

T = Escudos fiscales, se asume 35%.

Aplicando los datos en la fórmula 3.4, se tiene:

$$K_o = 8\% + 1,15 * 7.0\% + 8,12\%$$

$$K_o = 24,17\%$$

---

<sup>91</sup> WACC: Weighted Average Capital Costs (Costo promedio ponderado de capital)

<sup>92</sup>  $rf$ : risk-free rate (tasa libre de riesgo) – tasa de los bonos del tesoro de los estados Unidos - <http://www.valuwalk.com/2015/05/market-risk-premium-risk-free-rate-used-for-41-countries-in-2015/>

<sup>93</sup>  $\beta$ : Índice de la sensibilidad de la rentabilidad de un negocio particular con respecto a la rentabilidad de la cartera del mercado de esa línea de negocios.

<sup>94</sup>  $m$ : Es la diferencia entre la rentabilidad de la cartera de mercado de línea de negocios y la tasa libre de riesgo.

<sup>95</sup> Fuente: [https://contenido.bce.fin.ec/resumen\\_ticker.php?ticker\\_value=riesgo\\_pais](https://contenido.bce.fin.ec/resumen_ticker.php?ticker_value=riesgo_pais)

<sup>96</sup> Fuente: [https://contenido.bce.fin.ec/resumen\\_ticker.php?ticker\\_value=activa](https://contenido.bce.fin.ec/resumen_ticker.php?ticker_value=activa)

Reemplazando el valor de  $K_o$  y considerando que desea invertir en un proyecto de telecomunicaciones en Ecuador para el caso de una empresa que posea un capital de 30% (%E) en activos y 70% (%D) en deuda (menor riesgo de inversión) en la ecuación 3.2, tenemos:

$$WACC = 30\% * 24,17\% + \%70 * 8,71\% * (1 - 35\%)$$

$$WACC = 11,21405 \%$$

Lo que nos indica que la inversión debe ser realizada solo si se proyecta un rendimiento mayor al 11,21%.

### 3.1.4.2 Evaluación financiera

En este punto vamos a tratar acerca de los ingresos y egresos del proyecto, considerando un período de 3 años para retorno de la inversión:

**Opex**, se refiere a gastos que deben ser realizados para efectuar actividades y también son insumos que no llegan a ser activos fijos.

Para el caso del costo de la instalación de fibra se toma en cuenta la instalación de una fibra de 36 hilos y comprende los tramos: Nodo principal - Nodo secundario1 (11,3 Km), Nodo secundario 1 - Nodo secundario 2 (24,9 Km) y Nodo secundario 2 - Nodo principal (22,1 Km), se contemplan fusiones, herrajes e instalación de mangas. El mantenimiento de la Fibra Optica se lo realizaría de manera mensual durante los 3 años y el mantenimiento de los Equipos se lo realizaría cada 6 meces durante el mismo período.

	OPEX			
Actividades	Total	Año 1	Año 2	Año 3
Instalación F.O Backbone	\$ 195.061	\$-	\$-	\$-
Instalación Equipos Backbone	\$ 45.000	\$-	\$-	\$-
Mantenimiento F.O.	\$ 131.175	\$ 43.725	\$ 43.725	\$ 43.725
Mantenimiento Equipos Backbone	\$ 15.000	\$ 3.000	\$ 6.000	\$ 6.000
Total	\$ 386.236	\$ 46.725	\$ 49.725	\$ 49.725

Tabla 11. Tabla resumen referente al Opex del proyecto.

Fuente: El autor

Cabe indicar que los valores de Opex en cuanto a la instalación de la Fibra Optica para Backbone y la instalación de Equipos en los nodos dentro de los años de proyección para la recuperación del capital tienen valor cero ya que estos rubros son contemplados con anticipación a la habilitación del proyecto.

**Capex**, se refiere a inversiones que deben ser realizadas, esto incluye el equipamiento necesario para realizar el proyecto. Se toma como ejemplo (referencia) para los equipos DWDM la plataforma Alcatel-Lucent 1830 PSS y para los equipos/elementos de clientes se considera Patch Cords y conversores de fibra, por lo que se tiene la siguiente tabla:

	CAPEX			
Actividades	Total	Año 1	Año 2	Año 3
Compra Equipos Backbone	\$ 227.335	\$-	\$-	\$-
Compra Equipos/elementos clientes	\$ 20.000	\$ 20.000	\$-	\$-
Total	\$ 247.335	\$ 20.000	\$-	\$-

*Tabla 12. Tabla resumen referente al Capex del proyecto.*

*Fuente: El autor*

Cabe indicar que los valores de Capex para la compra de los Equipos de Backbone en los años proyectados es cero por la misma razón indicada para el tema del Opex. El valor de compra de equipos para clientes en el año 1 presenta el indicado en la tabla debido a que es en ese período de tiempo en el cual se activarán las capacidades destinadas a cada cliente (carrier).

A continuación se considera la factibilidad de brindar servicios a un grupo de 6 clientes (carriers), tomando como base al crecimiento en demanda que se tiene en tráfico en la actualidad. En el cuadro siguiente se tiene una tabla resumen de la capacidad por cliente, Los abonos asociados por el ancho de banda contratado, los abonos por instalación por los 3 años proyectados:



Ancho de Banda			Abono Unitario (Mega)	Abono Total	Mes Fact.	Cliente	Actividades	Año 1	Año 2	Año 3
Gigas	Megas	Megas Totales								
10	1024	10240	\$ 4	\$ 40.960	10	Cliente 1	Capacidad	\$ 122.880	\$ 393.216	\$ 314.573
				\$ 190			Instalación	\$ 190	\$-	\$-
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	7	Cliente 2	Capacidad	\$ 24.576	\$ 39.322	\$ 31.457
				\$ 230			Instalación	\$ 230	\$-	\$-
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	8	Cliente 3	Capacidad	\$ 20.480	\$ 39.322	\$ 31.457
				\$ 186			Instalación	\$ 186	\$-	\$-
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	10	Cliente 4	Capacidad	\$ 12.288	\$ 39.322	\$ 31.457
				\$ 178			Instalación	\$ 178	\$-	\$-
5	1024	5120	\$ 4	\$ 20.480	9	Cliente 5	Capacidad	\$ 81.920	\$ 196.608	\$ 157.286
				\$ 206			Instalación	\$ 206	\$-	\$-
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	5	Cliente 6	Capacidad	\$ 32.768	\$ 39.322	\$ 31.457
				\$ 226			Instalación	\$ 226	\$-	\$-
Total								\$ 295.902	\$ 747.110	\$ 597.688

Tabla 13. Tabla resumen del abono por ancho de banda contratado y por instalación en los 3 años proyectados.

Fuente: El autor

Ancho de Banda			Abono Unitario (Mega)	Abono Total	Mes Fact.	Cliente	Actividades	Costos
Gigas	Megas	Megas Totales						
10	1024	10240	\$ 4	\$ 40.960	10	Cliente 1	Capacidad	\$ 830.669
				\$ 190			Instalación	\$ 190
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	7	Cliente 2	Capacidad	\$ 95.355
				\$ 230			Instalación	\$ 230
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	8	Cliente 3	Capacidad	\$ 91.259
				\$ 186			Instalación	\$ 186
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	10	Cliente 4	Capacidad	\$ 83.067
				\$ 178			Instalación	\$ 178
5	1024	5120	\$ 4	\$ 20.480	9	Cliente 5	Capacidad	\$ 435.814
				\$ 206			Instalación	\$ 206
1	1024	1024	\$ 4	\$ 4.096	5	Cliente 6	Capacidad	\$ 103.547
				\$ 226			Instalación	\$ 226
Total								\$ 1.640.701

Tabla 14. Tabla resumen del abono Total por ancho de banda contratado y por instalación en los 3 años proyectados.

Fuente: El autor

Para la elaboración de las tablas 13 y 14, se asume los siguientes parámetros:

1. 6 clientes (carriers) cuya capacidad en ancho de banda (Gigas) es la indicada en la primera columna y su equivalente en Megas se encuentra en la tercera columna.
2. Un valor de \$4 por Mega de ancho de banda.
3. Un costo de instalación por activación de capacidad (incluidos: planta externa de acceso, fusiones, instalación de equipos en cliente y pruebas).
4. Una reducción en el costo de 20% al finalizar cada año.

Para continuar con el análisis financiero debemos definir ciertos parámetros:

**Valor Neto**, es la sumatoria de los valores de Ingresos menos el valor de la inversión inicial (Capex y Opex). Los valores obtenidos se encuentran en la tabla 15.

	Año 1	Año 2	Año 3
Valor Neto	\$ 229.403	\$ 697.385	\$ 547.963

*Tabla 15. Tabla resumen del valor neto en los 3 años proyectados.*

*Fuente: El autor*

**Valor Presente**, es el valor Neto pero traído al tiempo actual en base al parámetro WACC. Se lo calcula de la siguiente manera:

$$Valor\ presente = \frac{Valor\ Neto}{(1 + WACC)^{tiempo\ de\ evaluación}}$$

El tiempo de evaluación no es el mismo que el tiempo de proyección para el cuál se piensa recuperar la inversión. Este tiempo es el tiempo de análisis para el cual se está realizando ese momento el cálculo del valor presente (puede ser mes 1, mes 2, año 1, año 2.. etc). Ejemplo para el año 1:

$$Valor\ presente = \frac{\$ 229.177}{(1 + 11,21\%)^1}$$

$$\text{Valor presente} = \$ 206.068$$

En la tabla 16 se presentan los valores obtenidos del cálculo del valor presente.

	Año 1	Año 2	Año 3
Valor Presente	\$ 206.272	\$ 563.837	\$ 398.357

*Tabla 16. Tabla resumen del valor presente en los 3 años proyectados.*

*Fuente: El autor*

**Valor presente acumulativo**, es el valor presente actual sumado el valor presente anterior. En la tabla 17 se presentan los valores obtenidos del cálculo realizado.

	Año 1	Año 2	Año 3
Valor Presente Acumulado	(\$ 261.124)	\$ 302.713	\$ 701.070

*Tabla 17. Tabla resumen del valor presente acumulativo en los 3 años proyectados.*

*Fuente: El autor*

Existe un particular en el valor del año 1 y es que este valor es negativo debido a que el valor presente actual es igual al valor neto el cual es igual a la sumatoria del abono, Capex y Opex antes de iniciar el primer año.

Como no existe abono antes del año 1 entonces el valor inicial sería:

$$\$ 240.061 \text{ (Valor de Opex)} + \$ 227.335 \text{ (Valor de Capex)} = \$ 467.396$$

Este valor sería negativo ya que son egresos, a este le sumamos el Valor presente del año 1 cuyo valor es: \$ 206.272. Por lo que nos resultaría:

$$\$ 467.396 - \$ 206.272 = \$ 261.124$$

Como habíamos indicado, el valor \$ 467.396 es negativo, entonces el resultado también sería negativo.

**Gross Margin**, es la diferencia de los ingresos versus el Opex Total. La tabla 18 nos muestra el resultado de esta operación:

	Año 1	Año 2	Año 3
Gross Margin	\$ 249.403	\$ 697.385	\$ 547.963

*Tabla 18. Tabla resumen del valor del Gross Margin en los 3 años proyectados.*

*Fuente: El autor*

**Gross Margin porcentual**, es el valor en porcentaje de la división del Gross Margin frente al abono del proyecto. La tabla 19 nos muestra el resultado de esta operación:

	Año 1	Año 2	Año 3
Gross Margin %	84,22%	93,34%	91,68%

*Tabla 19. Tabla resumen del valor del Gross Margin porcentual en los 3 años proyectados.*

*Fuente: El autor*

**Máxima Exposición de caja**, es el valor de egreso más alto que se debe cubrir en el transcurso del proyecto.

**Punto de Equilibrio**, es el valor en tiempo en el cual un proyecto comienza a ser rentable.

**VAN**, es la suma de los Valores Netos menos la inversión inicial.

La tabla 20 nos muestra el resultado de todos estos parámetros descritos:

Resultados	
WACC	11,21%
WACC	0,89%
Máxima Exposición de Caja	\$ -481.434
Periodo de Repago (Punto de Equilibrio)	16,37799299
VAN	\$ 769.124
Gross Margin porcentual	93%

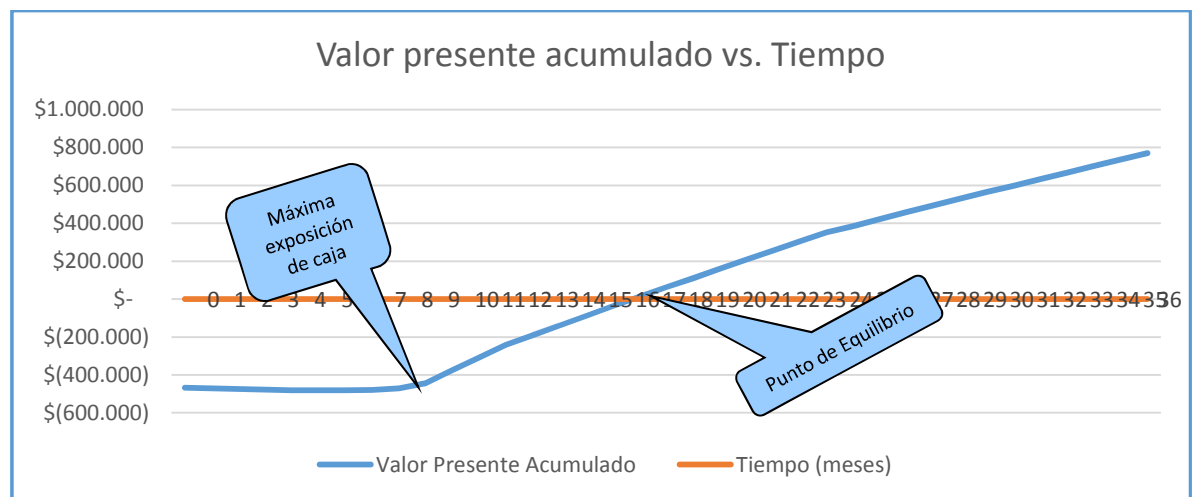
*Tabla 20. Tabla resumen con los valores de WACC, Máxima exposición de caja, Punto de equilibrio, VAN y Gross Margin porcentual.*

*Fuente: El autor*

Con esto podemos concluir que el proyecto es muy rentable y que el punto de recuperación se daría en el décimo sexto mes del período proyectado de recuperación (3 años).

#### 3.1.4.3 Resumen del flujo

A continuación se presenta un resumen del flujo en forma gráfica:



*Figura 14. Resumen gráfica del flujo del proyecto (Evaluación financiera)*

*Fuente: El autor*

En resumen podemos indicar que el punto de equilibrio se da a los 16 meses y el punto de máxima exposición de caja es: \$ -481.434.

#### 3.1.4.4 Financiamiento

El 30% del costo total sería proporcionado por los inversionistas por lo que para cubrir el 70% restante se debe buscar una fuente que proporcione este valor. De las tablas 11 y 12 los valores Costo Total (valor de CAPEX y OPEX) y costo a serían:

Costo Total	\$ 665.845
Costo a financiar	\$ 466.092

*Tabla 21. Costo Total y costo a financiar.*

*Fuente: El autor*

El endeudamiento se lo realizaría con un Banco y la tabla de amortización por un período de 5 años a una tasa de interés del 8,71%, sería:

n	saldo inicial	cuotas	interés	capital	saldo
1	466092	\$ 118.928,43	40596,6132	\$ 78.331,82	\$ 387.760,18
2	\$ 387.760,18	\$ 118.928,43	\$ 33.773,91	\$ 85.154,52	\$ 302.605,66
3	\$ 302.605,66	\$ 118.928,43	\$ 26.356,95	\$ 92.571,48	\$ 210.034,18
4	\$ 210.034,18	\$ 118.928,43	\$ 18.293,98	\$ 100.634,46	\$ 109.399,72
5	\$ 109.399,72	\$ 118.928,43	9528,715478	\$ 109.399,72	\$ 0,00

*Tabla 22. Tabla de amortización (tiempo: 5 años).*

*Fuente: El autor*

### 3.2 Selección de la tecnología y equipos para el diseño de la red

La plataforma para el diseño de la capa óptica se emplea en los tres nodos equipos tipo ROADM, en idéntica configuración y distribución para facilidad de la operación y mantenimiento, escalabilidad y manejo de stock de repuestos y/o crecimientos.

Esta arquitectura permite realizar Add/Drop y enrutamiento del tráfico, agregación y desagregación del tráfico y conexión de las interfaces de clientes a un equipo externo como un switch o router.

El rack a implementarse en todos los nodos es un rack estándar 300 –mm ETSI One rack con dimensiones 2200 mm (7.2 ft) x 600 mm (23.6 in) x 300 mm (11.8 in) (H x W x D). El ODF de reflejos de puertos cliente se ubicará en la parte superior del rack de equipos.

La señal del cliente es por lo general una señal óptica (1310 nm o 1550 nm). Esto significa que se requiere un transpondedor.

Para cumplir con la funcionalidad RODM, los equipos vendrían provisionados con una tarjeta del tipo Wavelength Router que permite el manejo de varias direcciones y el paso transparente entre un nodo y otro.

Debido a que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una única fibra, que debe ser capaz de combinar las señales entrantes se utiliza un multiplexor, que tiene longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las converge en un solo haz.

En el extremo receptor, el sistema debe ser capaz de separar los componentes de la luz de modo que puedan ser detectados discretamente. Los Demultiplexores realizan esta función mediante la separación del haz recibido en sus componentes de longitud de onda y el acoplamiento a las fibras individuales.

Un amplificador óptico amplifica la señal óptica directamente, sin la necesidad de convertirla en una señal eléctrica. Los sistemas ópticos de fibra utilizan amplificadores de erbio (EDFA) porque trabajan bien y son muy eficientes como amplificadores en el rango de 1550 nm. Sólo unas pocas partes por mil millones de erbio son necesarias.

Para el sincronismo de la red se utilizará una señal de reloj tipo PRC<sup>97</sup> provista por el equipo principal de clock de la red del proveedor de servicios.

La DCN<sup>98</sup> que permitirá supervisar esta red tiene dos componentes:

1. La parte In-Band que se manejaría vía OSPF<sup>99</sup> sobre los Canales de Supervisión Ópticos (OSC<sup>100</sup>) entre los sitios.
2. La parte Out-Band que permitiría la conectividad en modo redundante hacia el servidor de gestión.

---

<sup>97</sup> PRC: Primary Reference Clock – entrega señal de referencia para la sincronización de otros relojes en una red o una sección de red (ITU-T G811).

<sup>98</sup> DCN: Data Communication Network

<sup>99</sup> OSPF: Open Shortest Path First – Protocolo de enrutamiento dinámico del tipo Link-State

<sup>100</sup> OSC: Optical Supervision Channel

## 4 CAPÍTULO 4. DISEÑO DE RED DWDM PARA EL PROVEEDOR DE SERVICIOS.

### 4.1 Topología de Red

#### 4.1.1 Topología punto-punto

Es utilizada mayormente para transporte long-haul que requieren altas velocidades, agregados de valor alto, elevada integridad de la señal, gran confiabilidad y rápida capacidad de restauración. Entre transmisor y receptor la distancia puede ser de varios cientos de kilómetros y la cantidad de amplificadores típicamente menores a 10.

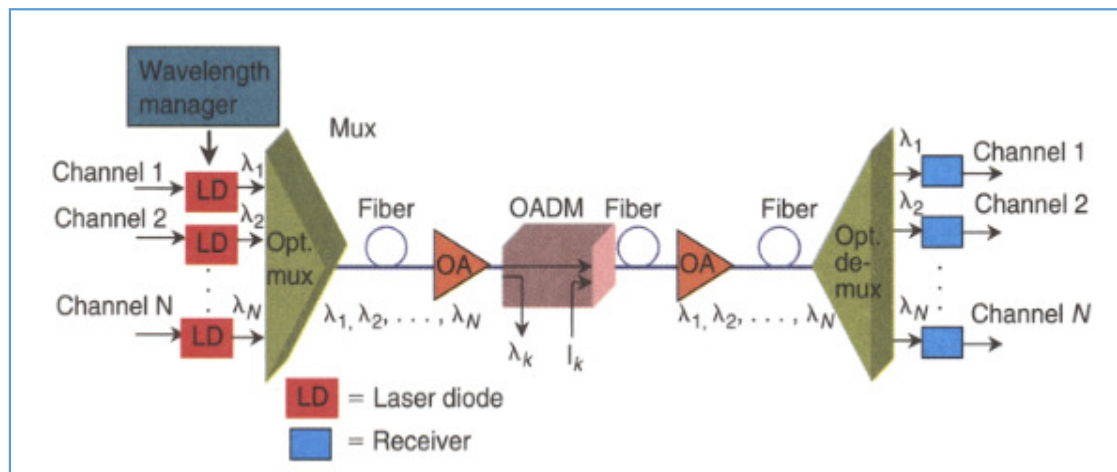


Figura 15. Topología DWDM punto-punto

Fuente: *Introduction to DWDM Technology* - Stamatios V. Kartalopoulos

#### 4.1.2 Topología en Anillo

Consiste de una fibra en configuración de anillo que interconecta completamente los nodos, algunos casos cuentan con anillos de fibra para la protección de la red. Esta configuración puede cubrir un área metropolitana o local y span de decenas de kilómetros. Uno de los nodos es la estación central, todos los nodos cuentan con multiplexores ópticos add/drop (OADM) para quitar o añadir uno o más canales de longitud de onda.



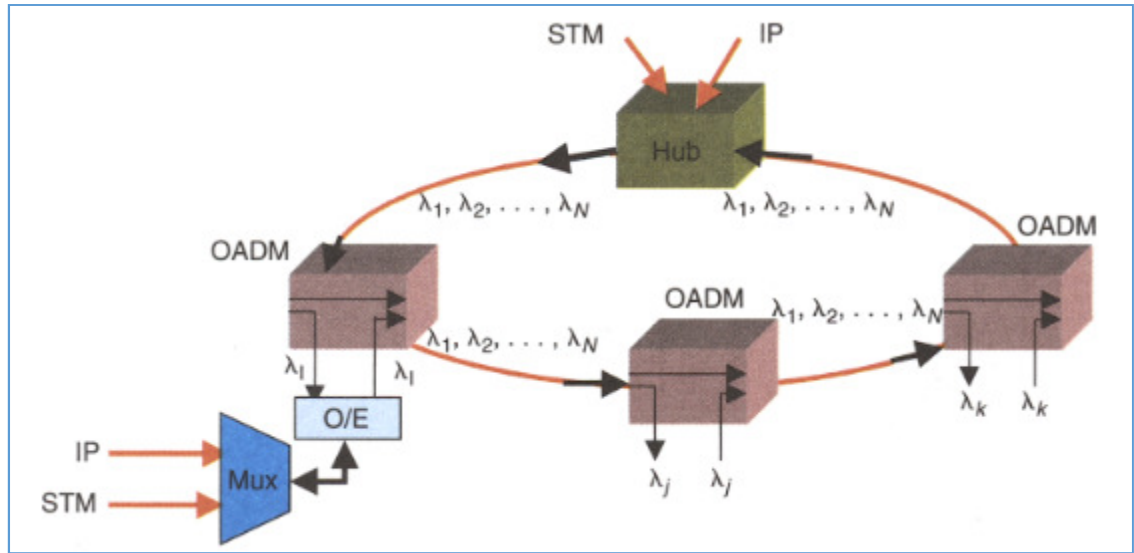


Figura 16. Topología DWDM Anillo

Fuente: Introduction to DWDM Technology - Stamatios V. Kartalopoulos

Esta es la topología empleada en el diseño la cual presenta flexibilidad y operación sin corte en la operación de servicios al momento de presentarse un daño en algún tramo del anillo, la falla vendría si existiese una doble apertura de anillo.

#### 4.2 Requerimientos y consideraciones de diseño

La red propuesta se encuentra compuesta por 3 Nodos: Principal, secundario 1 y secundario 2, las distancias se muestran en la Figura 17.

La banda de trabajo es la banda C en la ventana de 1550 nm (1530 nm – 195.95 THz a 1565 nm – 192 THz). Se considera 80 canales (espaciamiento de 100 GHz), cada uno de los cuáles de 100 Gbps.



*Figura 17. Diagrama General de la Red*

*Fuente: El autor*

#### 4.2.1 Consideraciones prácticas para la implementación de DWDM

1. Compatibilidad DWDM con la planta de fibra existente. Algunos tipos de fibra antigua no son adecuados para su uso en DWDM, mientras que los nuevos tipos, como NZ-DSF están optimizados para DWDM. Fibra SM estándar (ITU-T G. 652), que actualmente representa la mayor parte de la fibra instalada, puede soportar DWDM en el área metropolitana. Si debe colocarse nueva fibra, el tipo a ser elegido debe permitir el crecimiento futuro.
2. Especificaciones de los distintos elementos involucrados en el diseño.
3. Estrategia para protección.
4. Presupuesto de potencia.
5. Interoperabilidad.
6. Utilización de una herramienta de gestión.

#### 4.2.2 Presupuesto de Potencia Optico

El presupuesto de potencia óptica en sistemas DWDM significa calcular todas las pérdidas de la señal en cada componente en el trayecto óptico entre el transmisor y receptor. El principal objetivo es asegurar que la potencia de la señal óptica en el receptor sea más grande que la sensibilidad del receptor. Adicionalmente a lo expuesto anteriormente se debe considerar un margen de seguridad.

La ganancia y pérdida de potencia (dB) son aditivos, por lo que el presupuesto de potencia es un cálculo sencillo de suma o resta:

$$P_{TX} = P_{RX\text{Límite}} + \text{Pérdidas} + M_S \text{ (dB)}$$

*Ecuación 1. Potencia de Transmisión.*

*Fuente: DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION - Arnulfo Buelvas*

Donde:

$P_{TX}$  = Potencia de salida de transmisor

$P_{RX\text{Límite}}$  = Sensibilidad del receptor

$M_S$  = Margen de seguridad

El presupuesto de potencia se calcula como la diferencia entre  $P_{TX}$  y  $P_{RX\text{Límite}}$  que indica el máximo valor de pérdidas que el sistema puede admitir para que se asegure una recepción óptima de nivel de potencia. Si este valor es positivo entonces el sistema no requiere amplificación y si es negativo lo requeriría.

#### 4.2.3 Cálculo a nivel de Ancho de Banda

Para este punto debemos considerar la dispersión temporal total ( $\Delta T_d$ ), la cual se compone de la dispersión temporal modal ( $\Delta T_m$ ) (únicamente en fibra multimodo) y de la dispersión temporal cromática ( $\Delta T_c$ ) (en fibra multimodo y monomodo). En este caso haríamos uso de fibra monomodo por lo que la dispersión temporal modal sería igual a la dispersión temporal cromática.

$$\Delta T_d = (\Delta T_m^2 + \Delta T_c^2)^{1/2}$$

*Ecuación 2. Dispersión Temporal Total.*

*Fuente: DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION - Arnulfo Buelvas*

Ya que se utiliza fibra óptica monomodo  $\Delta T_m = 0$  por lo que la dispersión temporal total sería igual a la dispersión temporal cromática.

$$\Delta T_d = \Delta T_c$$

La dispersión cromática tiene relación con el coeficiente de dispersión cromática  $\theta_c$  (ns/nm\*Km) por lo que:

$$\Delta T_c = \theta_c * \Delta \lambda * L \text{ (ns)}$$

*Ecuación 3. Dispersión Total Cromática.*

*Fuente: DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION - Arnulfo Buelvas*

Donde:

$\theta_c$  = Coeficiente de dispersión cromática

$\Delta \lambda$  = Ancho espectral de la portadora óptica (nm)

L = distancia recorrida por la señal

El ancho de banda de la fibra óptica es:

$$BW_{fo} = \frac{0,44}{\Delta T_d}$$

*Ecuación 4. Ancho de banda de la fibra óptica.*

*Fuente: DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION - Arnulfo Buelvas*

$\Delta T_d = (\Delta T_m^2 + \Delta T_c^2)^{1/2}$  y como se trata de fibra monomodo:

$$\Delta T_d = (\Delta T_c^2)^{1/2} = \Delta T_c$$

Por lo que:

$$BW_{fo} = \frac{0,44}{\theta_c * \Delta \lambda * L}$$

#### 4.2.4 Cálculo a nivel de Ruido

La relación señal – ruido óptico viene expresada por la fórmula:

$$OSNR = 10 \log \frac{P_s}{P_n}$$

*Ecuación 5. Relación Señal a Ruido Optico.*

*Fuente: DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION - Arnulfo Buelvas*

Donde:

$P_s$  = Potencia de la señal

$P_n$  = Potencia del ruido

#### 4.2.5 Cálculo de la Atenuación

Para el cálculo de este parámetro se hace uso de la siguiente ecuación:

$$A_{enlace} = L * \alpha + N * \alpha_e + M \text{ (dB)}$$

*Ecuación 6. Atenuación del enlace.*

*Fuente: Estudio para la integración de la técnica de multiplexación DWDM dentro de un enlace*

*Quito - Guayaquil - José Luis Caizaluisa Palma*

Donde:

$A_{enlace}$  = Atenuación del enlace en dB

$L$  = Longitud del enlace en Kilómetros

$\alpha$  = Atenuación del cable en dB/Km

$N$  = número de empalmes

$\alpha_e$  = Atenuación por empalme en dB

$M$  = Margen de seguridad en dB

Se van a tomar las siguientes referencias para los cálculos:

1. Para la atenuación del cable se va a tomar el valor indicado en la recomendación ITU-T G.652 ( $\alpha = 0.28 \text{ dB/Km}$ ).
2. Atenuación por empalme  $\alpha_e = 0.1 \text{ dB}$  o  $0.2 \text{ dB}^{101}$  (si los conectores son del mismo fabricante) –  $0.35 \text{ dB}$  (si los conectores son de diferentes fabricantes).
3. Margen de seguridad de  $3 \text{ dB}$  (incluye pérdida de conectores y la restauración por falla en tramos).
4. Longitud de la bobina de fibra óptica  $2 \text{ Km}$  o  $4 \text{ Km}$ .

#### 4.2.6 Cálculo de la dispersión

Para el cálculo de este parámetro se hace uso de la siguiente ecuación:

$$L_{\text{límite de dispersión}} = \frac{\text{Tolerancia de dispersión}}{\text{coeficiente de dispersión}} (\text{Km})$$

*Ecuación 7. Límite de Dispersión.*

*Fuente: Estudio para la integración de la técnica de multiplexación DWDM dentro de un enlace*

*Quito - Guayaquil - José Luis Caizaluisa Palma*

Donde:

$L_{\text{límite de dispersión}}$  = longitud a la cual se presenta la máxima dispersión tolerable

Tolerancia de dispersión = valor numérico dado en  $\text{ps/nm}$

Coefficiente de dispersión = valor numérico dado en  $\text{ps/nm} \cdot \text{km}$

Se van a tomar las siguientes referencias para los cálculos:

1. Para el valor de la tolerancia de dispersión, se va a referir a la recomendación ITU-T G.655 ( $12800 \text{ ps/nm}$ ).

---

<sup>101</sup>  $\text{dB}$  (decibelio): es 10 veces el logaritmo decimal del cociente de dos valores de una variable.

2. Para el valor del coeficiente de dispersión se va a referir a la recomendación ITU-T G.652 (17 ps/nm.Km).

El resultado de esta cálculo nos indicará si se necesitaría o no de un compensador de dispersión, si la distancia fuese mayor al valor calculado.

#### 4.2.7 Cálculos teóricos

##### 4.2.7.1 Cálculo de la atenuación.

Para el cálculo se realiza en base a la ecuación 6. El número de empalmes se lo va a realizar mediante la división de la longitud del enlace y la longitud de la bobina (a considerar bobina de 4 Km), se debe tomar en cuenta la suma de 1 (ya que se debe considerar los empalmes realizados en cada extremo). Tomando como ejemplo el enlace Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2

$$N = \frac{\text{Longitud del enlace (Km)}}{\text{Longitud de la bobina (Km)}} + 1$$

$$N = \frac{24.9 \text{ Km}}{4 \text{ Km}} + 1$$

$$N = \frac{24.9 \text{ Km}}{4 \text{ Km}} + 1$$

$$N = 7,225 \approx 7$$

Realizamos el reemplazo de valores en la ecuación 6, considerando valor de atenuación por empalme de 0.2 dB:

$$A_{\text{enlace}} = 24.9 \text{ Km} * 0.25 \frac{\text{dB}}{\text{Km}} + 7 * 0.2 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$$

$$A_{\text{enlace}} = 6.225 \text{ dB} + 1.4 \text{ dB} + 3 \text{ dB}$$

$$A_{\text{enlace}} = 10,625 \text{ dB}$$

Enlace	Nodo principal - Nodo secundario 1
Distancia (Km)	11.3
Atenuación de la fibra óptica (dB/Km)	0.25
Número de empalmes	4
Margen de seguridad (dB)	3
Atenuación ( dB)	6,625

*Tabla 23. Atenuación Enlace Nodo principal – Nodo secundario 1*

*Fuente: El autor*

Enlace	Nodo secundario 1 - Nodo secundario 2
Distancia (Km)	24.9
Atenuación de la fibra óptica (dB/Km)	0.25
Número de empalmes	7
Margen de seguridad (dB)	3
Atenuación ( dB)	10.625

*Tabla 24. Atenuación Enlace Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2*

*Fuente: El autor*

Enlace	Nodo secundario 2 - Nodo principal
Distancia (Km)	22.10
Atenuación de la fibra óptica (dB/Km)	0.25
Número de empalmes	7
Margen de seguridad (dB)	3
Atenuación ( dB)	9,925

*Tabla 25. Atenuación Enlace Nodo Principal – Nodo secundario 2*

*Fuente: El autor*

#### 4.2.7.2 Cálculo de la dispersión

Se va a realizar el ejemplo de cálculo de la dispersión en base a la ecuación 7:



$$L_{\text{límite de dispersión}} = \frac{12800 \left( \frac{ps}{nm} \right)}{17 \left( \frac{ps}{nm * Km} \right)}$$

$$L_{\text{límite de dispersión}} = 752,94 Km$$

Del cálculo realizado, se puede indicar que para ningún tramo del anillo se necesitaría un compensador de dispersión.

#### 4.2.8 Cálculo de la Ganancia

Para el cálculo de este parámetro vamos a considerar los siguientes valores de transmisión y sensibilidad de los elementos:

Potencia de salida del transmisor		-8 dBm
Detector tipo APD	Señal de recepción máxima	-10 dBm
	Sensibilidad del receptor	-35 dBm

*Tabla 26. Valores de Potencia de salida del transmisor y Sensibilidad del receptor*

*Fuente: El autor*

De la ecuación 1 despejamos el valor de la ganancia (G), por lo que:

$$G = P_{TX} - P_{RX\text{Límite}}$$

$$G = -8 dBm - (-35 dBm)$$

$$G = 27 dBm$$

#### 4.2.9 Cálculo de la pérdida permisible máxima en la fibra

Para el cálculo de este parámetro vamos a considerar los siguientes valores:

Atenuación ( dB) Nodo principal – Nodo secundario 1	6,625
Atenuación ( dB) Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2	10,625
Atenuación ( dB) Nodo Principal – Nodo secundario 2	9,925

*Tabla 27. Valores de atenuación de cada enlace.*

*Fuente: El autor*

Por lo que la pérdida permisible máxima (LP) en la fibra sería:

$$L_p = G - A_{enlace} \quad (4.10)$$

Nodo principal – Nodo secundario 1:

$$L_p = 27 \text{ dBm} - 6,625 \text{ dB}$$

$$L_p = 20,375$$

Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2:

$$L_p = 27 \text{ dBm} - 10,625 \text{ dB}$$

$$L_p = 16,375$$

Nodo Principal – Nodo secundario 2:

$$L_p = 27 \text{ dBm} - 9,925 \text{ dB}$$

$$L_p = 17,075$$

Haciendo una comparación con los valores de pérdida total de la fibra (Tabla 24) se concluye que:

Pérdida total de la fibra ( dB) Nodo principal – Nodo secundario 1	2,825
Pérdida total de la fibra ( dB) Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2	6,225
Pérdida total de la fibra ( dB) Nodo Principal – Nodo secundario 2	5,525

*Tabla 28. Valores de pérdida total debido a la fibra en cada enlace.*

*Fuente: El autor*

Las pérdidas de las fibras totales se encuentran dentro del máximo permisible en cada enlace.

#### 4.2.10 Cálculo del nivel de recepción de la señal

Para el cálculo de este parámetro vamos a considerar los siguientes valores:

Potencia de salida del transmisor (dBm)		-8
Atenuación ( dB) Nodo principal – Nodo secundario 1		-6,625
Atenuación ( dB) Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2		-10,625
Atenuación ( dB) Nodo Principal – Nodo secundario 2		-9,925
Detector tipo APD	Señal de recepción máxima (dBm)	-10
	Sensibilidad del receptor (dBm)	-35

*Tabla 29. Valores de potencia de salida del transmisor y Valores de atenuación de cada enlace.*

*Fuente: El autor*

$$P_{TX} = P_{RX\text{Límite}} - A_{\text{enlace}}$$

Nodo principal – Nodo secundario 1:

$$P_{TX} = -8 \text{ dBm} - 6,625 \text{ dB}$$

$$P_{TX} = -14,625 \text{ dB}$$

Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2:

$$P_{TX} = -8 \text{ dBm} - 10,625 \text{ dB}$$

$$P_{TX} = -18,625 \text{ dB}$$

Nodo Principal – Nodo secundario 2:

$$P_{TX} = -8 \text{ dBm} - 9,925 \text{ dB}$$

$$P_{TX} = -17,925 \text{ dB}$$

Se concluye que el nivel de potencia recibida se encuentra dentro de la sensibilidad del receptor. Por lo que no se requiere amplificación y tampoco atenuadores.

#### 4.2.11 Diagrama de la conexión SDH – DWDM

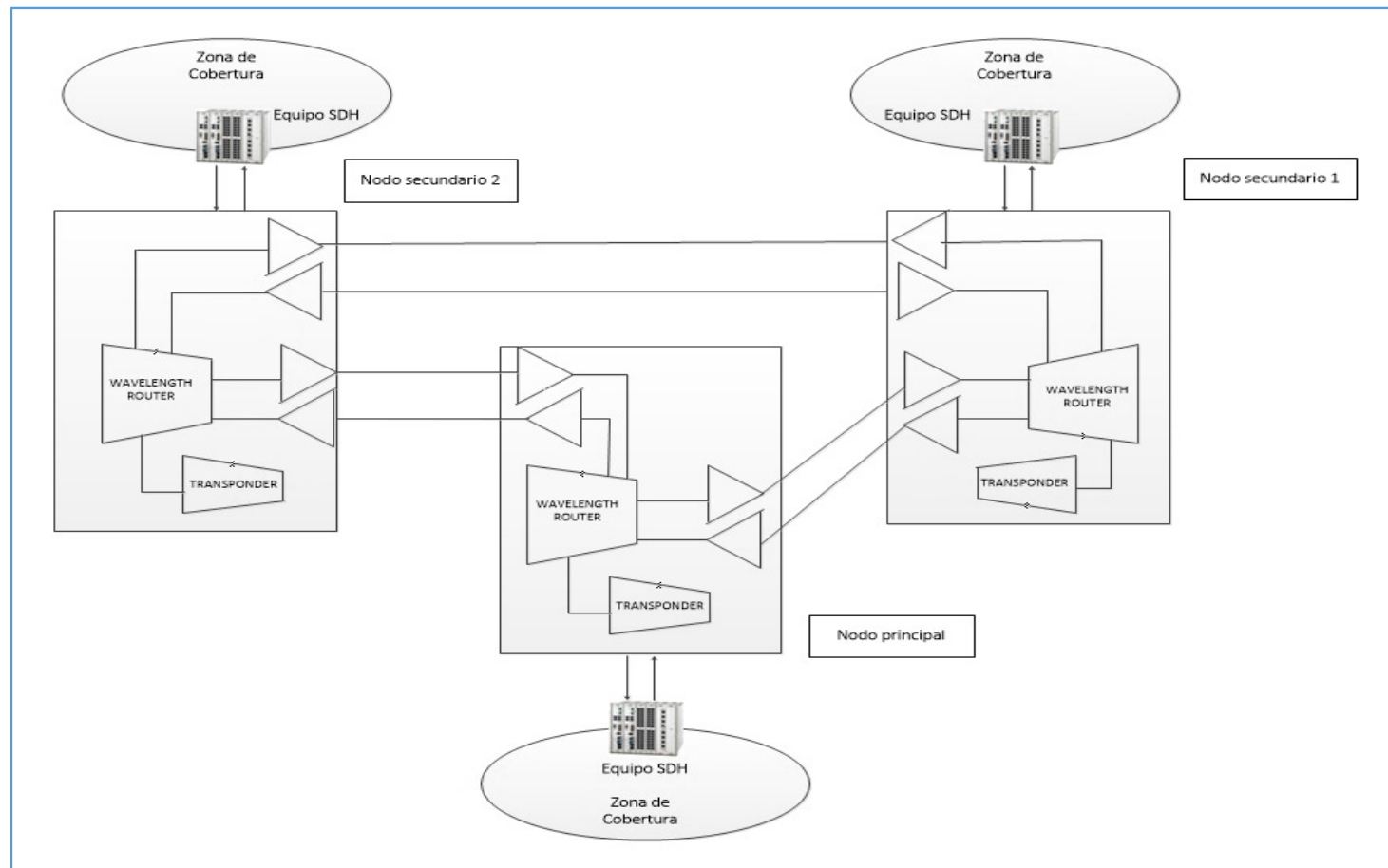


Figura 18. Diagrama de la conexión SDH/DWDM.

Fuente: El autor

Para la interconexión entre el sistema DWDM y el sistema SDH se utilizarán módulos ópticos de la capacidad adecuada para que el tráfico fluya sin inconvenientes. Puede ser STM-16, STM-4 o STM-1.

La migración o conexión a una red mucho más robusta y con capacidad configurable se da por los siguientes motivos:

1. DWDM es la mejor opción para el incremento de capacidad en transmisión.
2. El incremento de capacidad en red SDH demanda un gasto excesivo que no es conveniente si existe una mejor solución.
3. No es de vital importancia si la información se encuentra en alguno de los formatos como: IP, Gigabit Ethernet, SDH, etc. Ya que para esta tecnología este tema es transparente.
4. Los equipos SDH se utilizarán como elementos de acceso y de baja capacidad, ya sea, E1s, DS3, STM-1, conexiones LAN, pero se seguirá manteniendo la capacidad actualmente implementada.

#### 4.2.12 Asignación de lambdas

Se requiere tomar en consideración para la asignación de lambdas la recomendación ITU-T G.694.1 – Planes Espectrales para las WDM: Plan de frecuencia con DWDM -. En donde se especifica un plan de frecuencias que considera varios espaciamientos de canal (12,5 – 100 GHz y múltiplos enteros de este último). La tabla 30 nos indica la asignación realizada para los clientes.

Cliente	Ancho de Banda (Gigas)	$\lambda$ (nm)
Cliente 1	10	1550.12
Cliente 2	1	1549.32
Cliente 3	1	1548.51
Cliente 4	1	1547.72
Cliente 5	5	1546.92
Cliente 6	1	1546.12

*Tabla 30. Asignación de lambdas para los clientes (carriers).*

*Fuente: El autor*

### 4.3 Funcionalidades y beneficios

La ventaja obvia de la tecnología DWDM es la de tener una capacidad ilimitada en transmisión. Si la demanda cambia, el incremento de la capacidad se hace relativamente fácil ya sea con inserción de tarjetas o simplemente activar nuevas longitudes de onda, sin tener que hacer uso del cambio del equipo completo.

Se garantiza transparencia, ya que siendo una arquitectura de capa física puede soportar de forma transparente ya sea TDM y diferentes formatos de datos como ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, Fiber Channel. Esto permite diversidad de conexiones a varios elementos para un servicio apropiado.

Uno de los beneficios importantes es la escalabilidad, esto ya que DWDM puede influenciar en la existente fibra en redes ya instaladas para de forma rápida satisfacer la necesidad en cuanto a la demanda de capacidad en enlaces punto a punto o en anillos.

Cabe destacar que el aprovisionamiento sería dinámico, rápido y simple para los proveedores, de forma tal de entregar servicios de alto ancho de banda de días en lugar de meses.

En redes Long-haul, DWDM es de suma importancia ya que proveedores estaban limitados económicamente para el crecimiento de sus redes que resultaba en una inversión costosa y a un tiempo muy elevado. Estas inversiones involucraban tanto el tendido de fibra hacia las áreas que deseaban ser cubiertas como el crecimiento en la red de Backbone.

Con DWDM es relativamente asequible el incremento de la amplitud en las redes a través del aumento de la capacidad de la fibra ya existente manteniendo la electrónica (tecnología) instalada. Como se consigue esto?, mediante la adición de equipos que manejen esta tecnología en sitios cruciales para de forma inmediata contar con una capacidad mayor para el transporte y a un costo accesible.

Los sistemas DWDM son aplicables a muchos tipos de redes y en todas las capas de red (ver Figura 19).

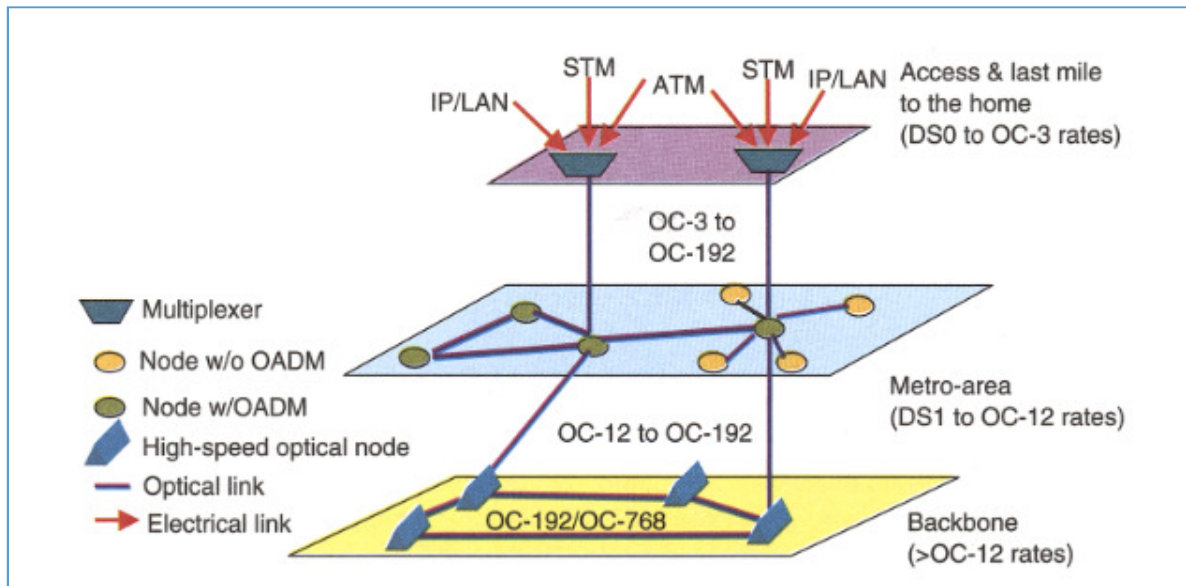


Figura 19. WDM es aplicable todas las capas de red, de acceso a Backbone.

Fuente: Introduction to DWDM Technology - Stamatios V. Kartalopoulos

Son aplicables por ejemplo en redes intercontinentales (interconexión de grandes áreas geográficas), transoceánicas (interconexión entre continentes). También son aplicables a áreas metropolitanas que conectan edificios de gran altura, campus y edificios de varios niveles. Son aplicables a redes de una sola empresa con pocos nodos, donde una gran variedad de tipos de tráfico se conjugan para ser transportados a una red de nivel más alto.

#### 4.4 Equipamiento

En la Tabla 31 se indican los equipos que se necesita para la red propuesta:

Equipos del proyecto			
Elementos por Nodo	Cantidad x nodo	Cantidad total nodos	Cantidad total incluido spares
<b>Commons</b>			
Main Shelf Kit PSS-32, High Capacity Fan (incl. COSHF, USRPNL, FAN32H, TIBNKx2)	1	3	4
OneRACK ETSI	1	3	3
CO Shelf Installation Kit (ETSI Rack)	1	3	3
Attenuation Drawer (1U)	1	2	2
DCM Shelf (ETSI/ANSI)	1	3	3
OMD Installation Kit (EIA, ANSI, or ETSI)	2	6	6
Fiber Storage Tray Kit	1	3	3
Equipment Controller (16GB)	2	6	8
DC Power Filter (50A) w/ V Monitoring	2	6	8
Power Distribution Unit - ETSI (4 inputs, 12 outputs)	1	3	4
Breaker, 63A	2	6	6
<b>Módulos</b>			
(B&W Multirate 11G (STM64/OC-192/OTU-2/10GBASE-LX) DDM (1310nm)	24	72	75
(B&W STM-16/OC-48 Multirate (< 2.7G) DDM 1310nm (S-16.1/IR-1))	4	12	16
OC3/STM1 PIN SFP (1510nm)	2	6	7
<b>Optical Transponder</b>			
11G Dual Port Pluggable Multirate Mux (12 universal clients)	2	6	9
130SCX10 100G Mux, 10CL, SDFEC Coherent	2	6	9
<b>Filters</b>			
8 channel wavelength router - Add side	2	6	9
44 Channel Optical Mux/Demux	2	6	7
<b>Interleaver</b>			
88 Channel Interleaver (unidirectional)	2	6	7

Tabla 31. Listado de equipos probables a utilizarse en el planteamiento del proyecto.

Fuente: El autor



## 5 CAPITULO 5. SIMULACION DE LA RED.

### 5.1 Selección del software de simulación

A continuación se va a realizar la simulación del sistema planteado, para lo cual se requiere de un software que nos ayuden en esta tarea. Se han encontrado varios simuladores (software libre) entre los cuales se anotan los siguientes:

1. OPTSIM (OptiSystem - Optiwave).
2. VPI TRANSMISION MAKER OPTICAL SYSTEM.
3. PHOTONIC NETWORK SIMULATOR (PHOTONET).
4. OPTICAL WDM NETWORK SIMULATOR: OWNS.
5. ASONS - AN AUTOMATICALLY SWITCHED OPTICAL NETWORK SIMULATOR.
6. OPTISYSTEM.

Se van a presentar algunas características de los programas OPTSIM y OPTISYSTEM ya que son dos programas disponibles al momento y que no requieren de búsquedas o descargas.

#### 5.1.1 Optisim

Provee una plataforma ideal para modelar sistemas ópticos y PICs<sup>102</sup> que operan con acoplamiento y alimentación de diferentes señales ópticas y eléctricas. La interfaz gráfica del usuario ofrece una experiencia de usuario más natural para probar y optimizar el rendimiento de PICs a nivel del sistema.

Cuenta con una amplia librería que contiene, acopladores, guías de onda, moduladores, fuentes ópticas, fotodiodos. Se suministra herramientas de medición y trazado, tales como: analizadores de señal, espectro, medidores de potencia, etc.

Ofrece opciones poderosas para la configuración del diseño, visualización de datos, trazado y administración de los recursos del proyecto.

##### 5.1.1.1 Aplicaciones

1. Circuitos Integrados fotónicos (PICs) de una o varias etapas.
2. Transceivers para sistemas de comunicación de fibra óptica coherente y no coherente.
3. Sistemas fotónicos con interferencia por trayectos múltiples, reflexiones y resonancias.

---

<sup>102</sup> PIC: Photonic Integrated Circuit

### 5.1.2 OPTISYSTEM

Es un software de diseño integral que permite a los usuarios realizar simulaciones de un diseño de fibra óptica, con este aplicativo se puede planificar, realizar pruebas de ensayo y error, simular enlaces ópticos en la capa de transmisión de redes ópticas.

Cuenta con una interfaz gráfica de usuario muy amigable, permite realizar mezclas de ondas, se puede observar fenómenos como la modulación cruzada de fase. Proporciona un entorno muy sólido para ejecutar desde diseños básicos hasta muy complejos y simulación de enlaces ópticos de una amplia variedad de redes pasivas como: BPON, EPON, GPON.

#### 5.1.2.1 Aplicaciones

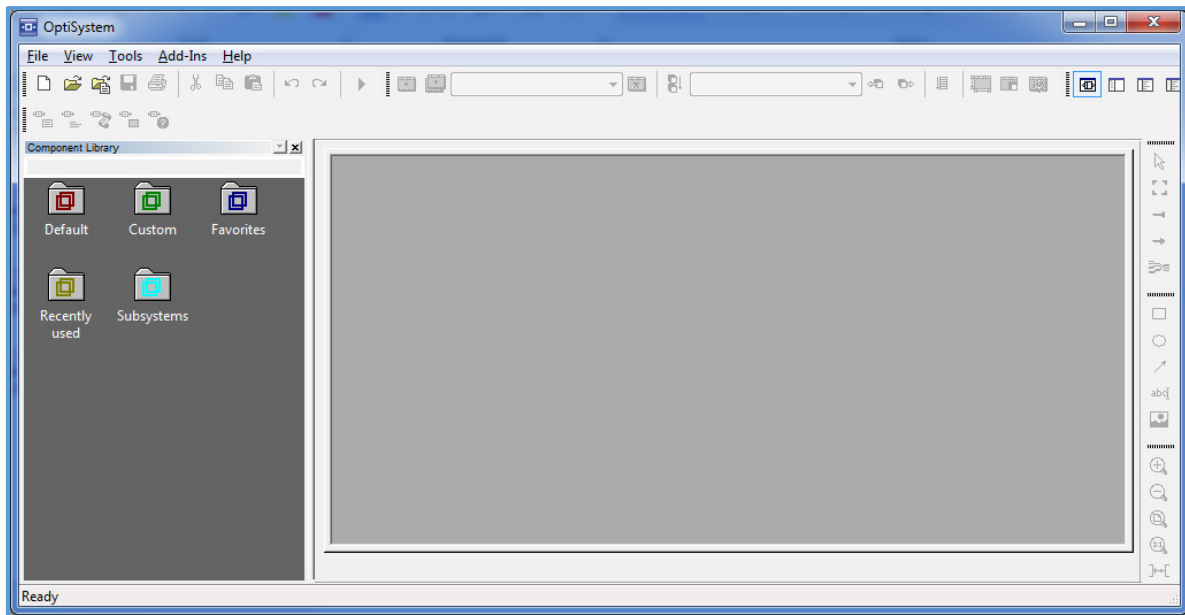
1. Simulación de redes ópticas.
2. Simulación de Redes SDH y SONET.
3. Simulación de amplificadores.

La elección del software OPTISYSTEM se lo ha realizado en base a los siguientes criterios:

1. Dispone de mayor información para su utilización.
2. Cuenta con una interfaz mejorada y una biblioteca que se adecúa a la simulación planteada.
3. Es uno de los simuladores disponibles en laboratorio.
4. Se cuenta con la versión: 14,1,0, 528.

#### 5.1.2.2 Pantallas principales del programa Optisystem

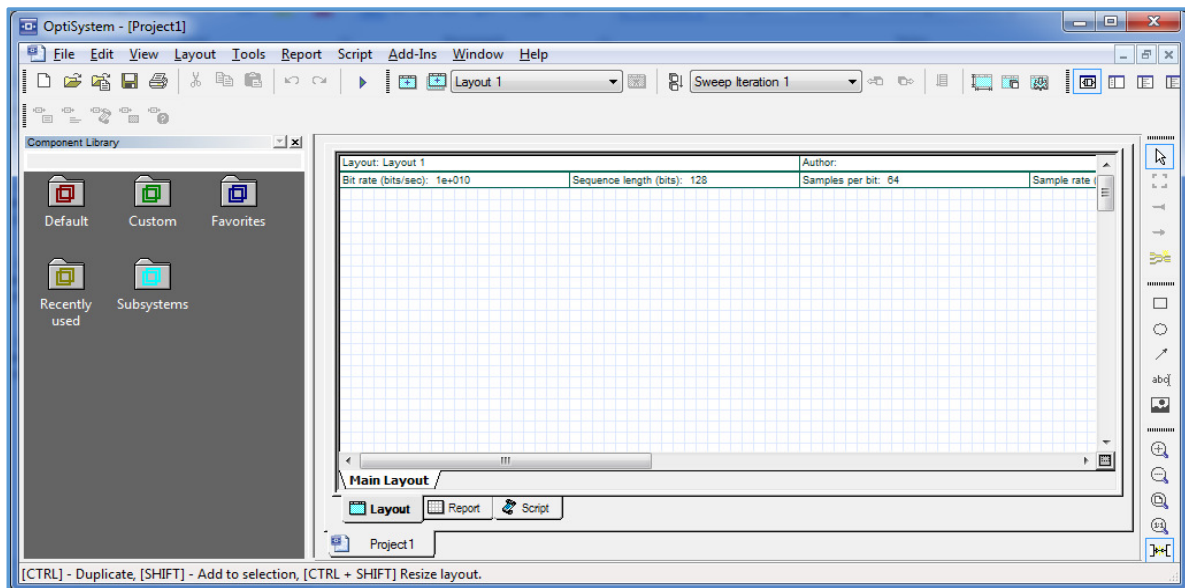
Al abrir el programa por primera ocasión se presenta la pantalla principal la cual nos presenta la barra de menús, librerías, algunas funciones como nuevo, abrir, abrir ejemplo, barra de estado. La figura 19 muestra lo indicado:



*Figura 20. Pantalla principal software Optisystem*

*Fuente: El autor – Software Optisystem*

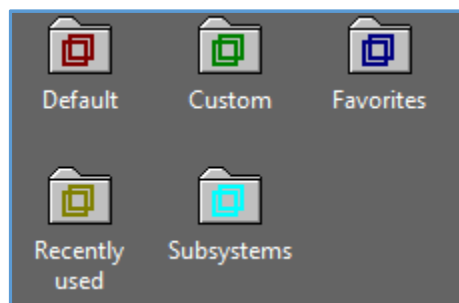
Si iniciamos en barra de menús un proyecto nuevo nos aparecerá la ventana de la figura 20, en donde podemos en base a las librerías disponibles comenzar con la gráfica del diseño planteado con sus diferentes componentes.



*Figura 21. Pantalla proyecto nuevo software Optisystem*

*Fuente: El autor – Software Optisystem*

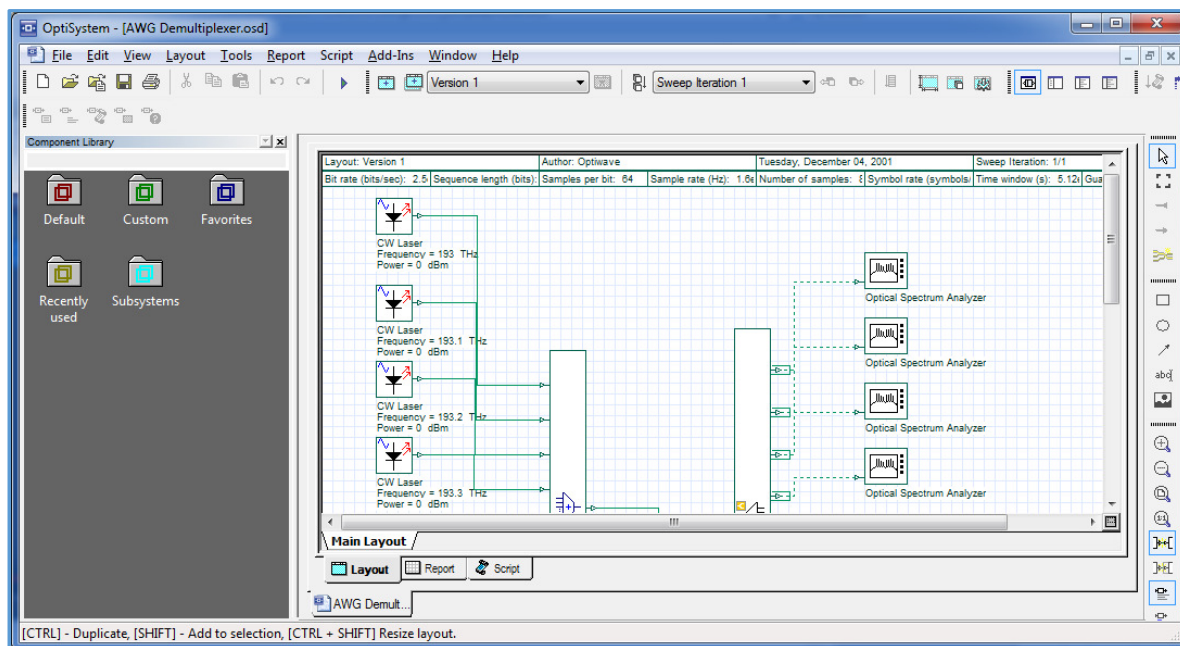
La biblioteca de los componentes contiene los elementos para realizar un diseño, cuenta con varias carpetas: default (que contiene componentes default), custom (para elementos personalizados), favorites (componentes utilizados frecuentemente), recently used, subsystem (sistemas credos para ser utilizados.)



*Figura 22. Pantalla Biblioteca de componentes software Optisystem*

*Fuente: El autor – Software Optisystem*

A continuación en la figura 22 se indica una pantalla que contiene un ejemplo de diseño con la herramienta optisystem.



*Figura 23. Pantalla ejemplo de diseño software Optisystem*

*Fuente: El autor – Software Optisystem*

## 5.2 SIMULACION DE LA RED DWDM.

A continuación se muestra el modelado de una red DWDM a través del uso del programa de simulación Optisystem. El Diagrama de la figura 24 muestra el enlace Nodo secundario 1 – Nodo secundario 2, el cual se utiliza para la simulación:

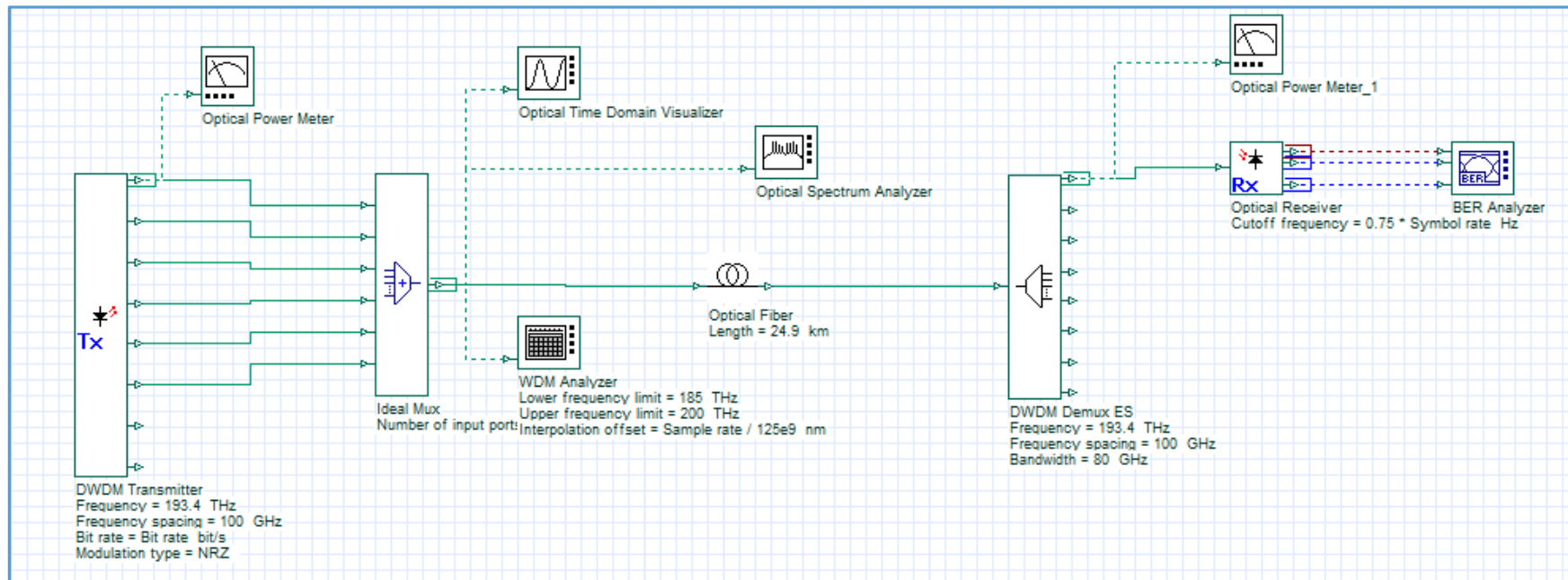


Figura 24. Diagrama de la red Óptica a ser modelada.

Fuente: El autor – Software Optisystem

Los parámetros a ser empleados en la simulación se describen en la tabla 32:

Enlace	Nodo secundario 1 - Nodo secundario 2
Distancia (Km)	24.9
Atenuación de la fibra óptica (dB/Km)	0.25
Número de empalmes	7
Margen de seguridad (dB)	3
Atenuación (dB)	10.625
Potencia de salida del transmisor	-8 dBm
Transmisor DWDM - # canales	8
Modulación	NRZ
Frecuencia	1550 nm
Separación	100 GHz

Tabla 32. Parámetros a ser utilizados en la simulación de la red DWDM.

Fuente: El autor

### 5.2.1 Resultados obtenidos de la simulación

Una vez ubicados los elementos en el simulador (transmisor, multiplexor, fibra, demultiplexor, receptor), equipos de medición (power meter, analizador de espectro óptico, analizador WDM, analizador de BER) y realizadas las conexiones tal como indica la figura 24 se procede a iniciar la simulación.

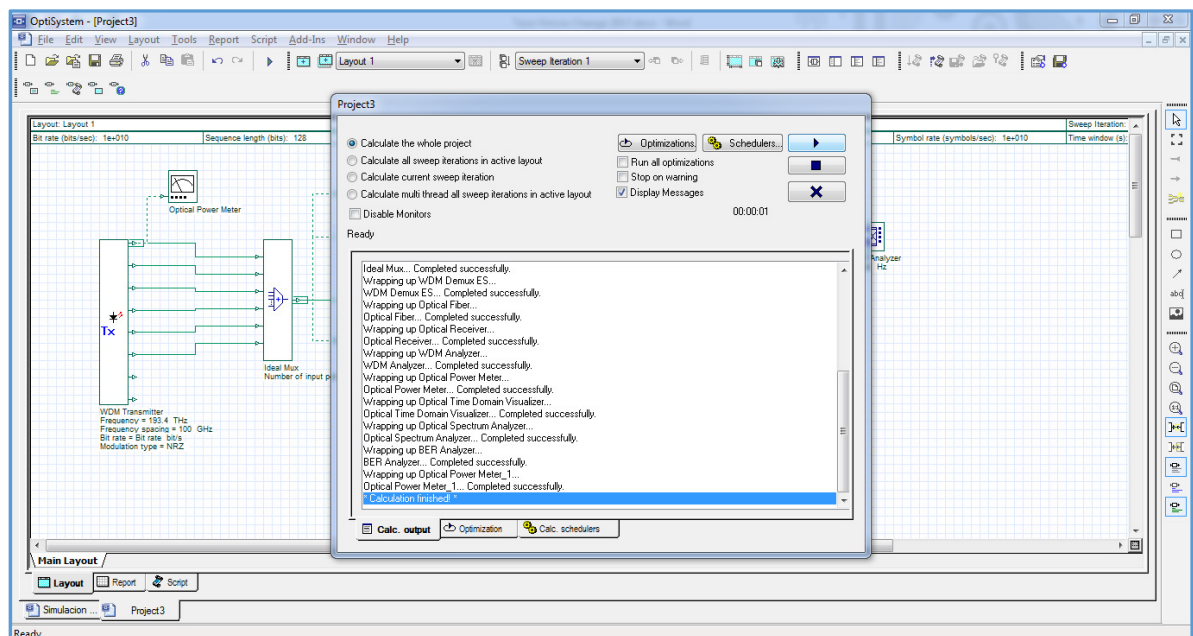


Figura 25. Inicio de la simulación en el simulador Optisystem

Fuente: El autor – Software Optisystem

La primera medición realizada con el power meter es a la salida del Transmisor DWDM en el puerto 1. La Figura 26 muestra el detalle de la medición tanto en watts como en dBm.

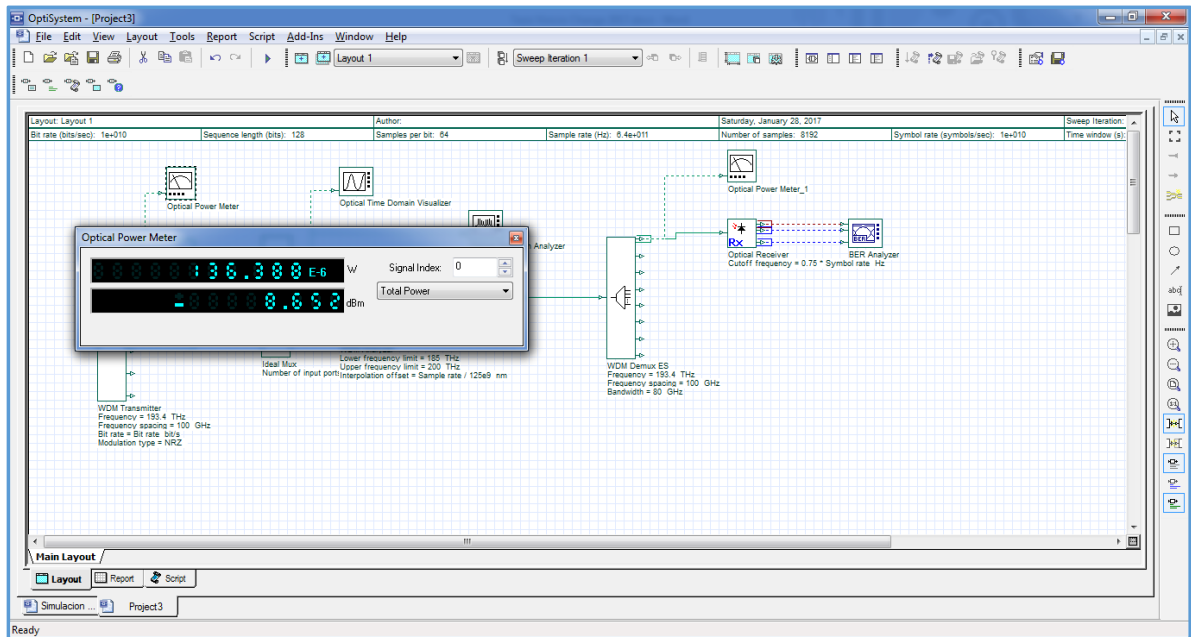


Figura 26. Medición de potencia a la salida del Transmisor Optico puerta 1.

Fuente: El autor – Software Optisystem

La segunda medición se realiza a la salida del multiplexor óptico con el visualizador óptico en el dominio del tiempo). La figura 27 muestra la gráfica obtenida de la medición realizada.

La tercera medición se realiza a la salida del multiplexor óptico con el analizador de espectro óptico. La figura 28 muestra la gráfica de seis canales conectados.

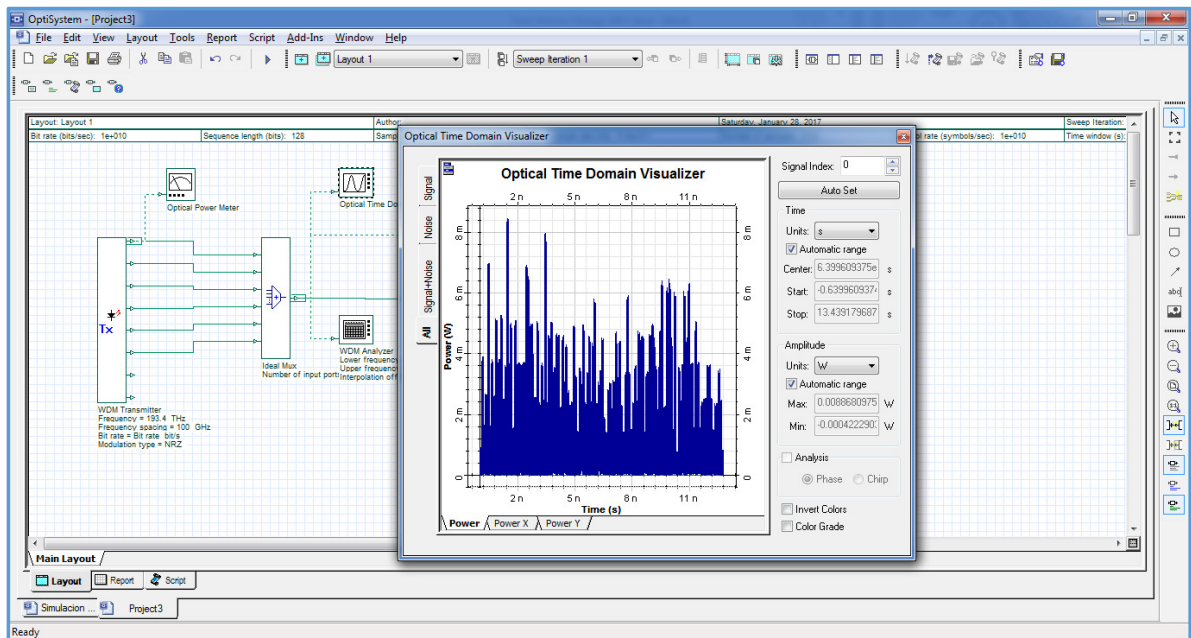


Figura 27. Medición de señal óptica en el dominio del tiempo a la salida del multiplexor óptico.

Fuente: El autor – Software Optisystem

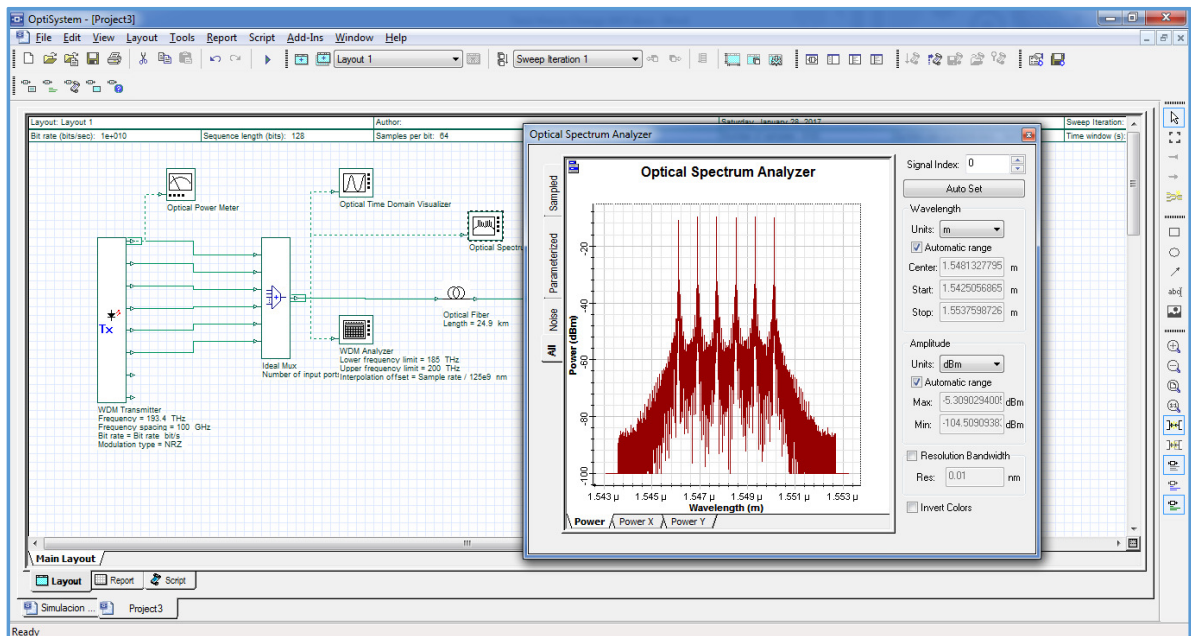


Figura 28. Medición del espectro de la señal óptica a la salida del multiplexor óptico.

Fuente: El autor – Software Optisystem



La cuarta medición realizada es a la salida del multiplexor óptico con el analizador WDM. La figura 30 muestra las frecuencias de los canales (lo cual concuerda con el plan de canal DWDM 100 GHz de separación – ITU-T G.694.1 – Figura 29), la potencia de la señal en dBm y la potencia de ruido en dBm.

	Channel Number	ITU Freq. (THz)	Wave-length (nm)		Channel Number	ITU Freq. (THz)	Wave-length (nm)
Group E	16	191.6	1564.68	Group B	43	194.3	1542.94
	17	191.7	1563.86		44	194.4	1542.14
	18	191.8	1563.05		45	194.5	1541.35
	19	191.9	1562.23		46	194.6	1540.56
	20	192.0	1561.42		47	194.7	1539.77
	21	192.1	1560.61		48	194.8	1538.98
	22	192.2	1559.79		49	194.9	1538.19
	23	192.3	1558.98		50	195.0	1537.40
Group D	25	192.5	1557.36	Group A	52	195.2	1535.82
	26	192.6	1556.55		53	195.3	1535.04
	27	192.7	1555.75		54	195.4	1534.25
	28	192.8	1554.94		55	195.5	1533.47
	29	192.9	1554.13		56	195.6	1532.68
	30	193.0	1553.33		57	195.7	1531.90
	31	193.1	1552.52		58	195.8	1531.12
	32	193.2	1551.72		59	195.9	1530.33
Group C	34	193.4	1550.12				
	35	193.5	1549.32				
	36	193.6	1548.51				
	37	193.7	1547.72				
	38	193.8	1546.92				
	39	193.9	1546.12				
	40	194.0	1545.32				
	41	194.1	1544.53				

Figura 29. Plan de canales DWDM con separación 100 GHz.

Fuente: CIENA CN4200 COMMON OPTICAL FILTERS APPLICATIONS GUIDE - 2007

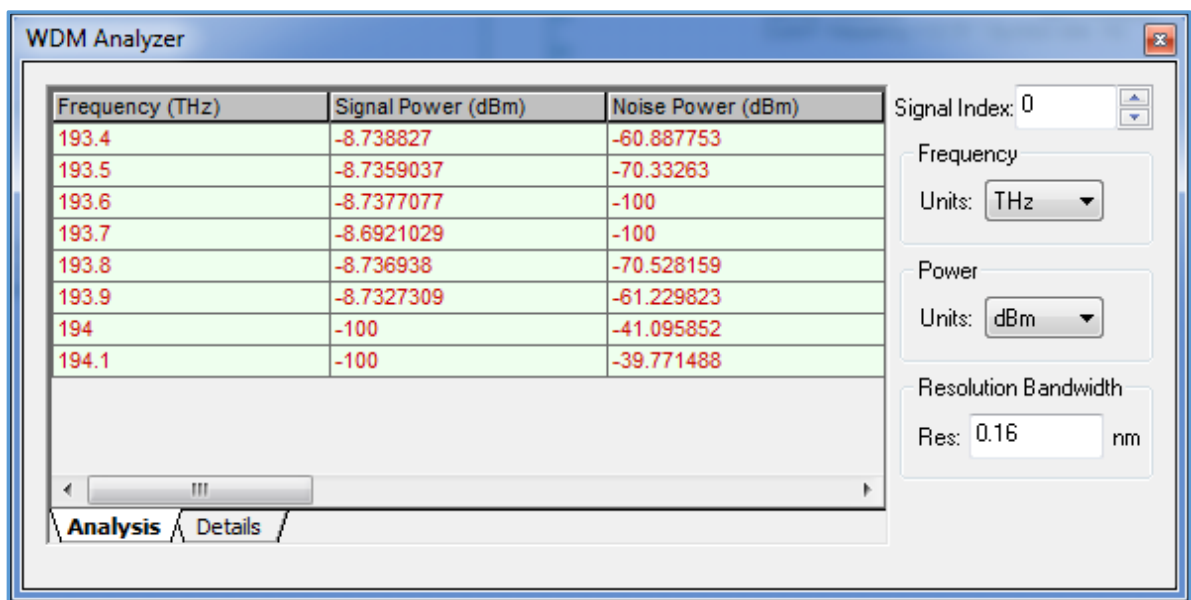
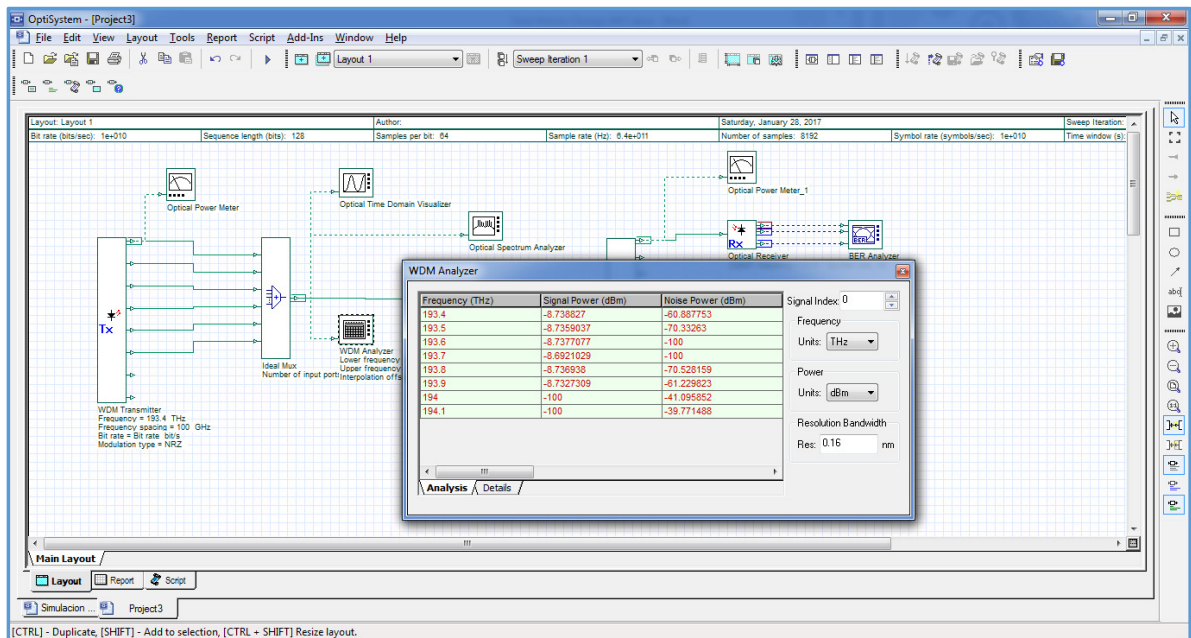


Figura 30. Medición de la señal óptica a la salida del multiplexor óptico mediante el analizador WDM.

Fuente: El autor – Software Optisystem

La quinta medición se realiza con el power meter a la salida del Demultiplexor óptico en el puerto 1. La figura 31 muestra el detalle de la medición tanto en watts como en dBm.

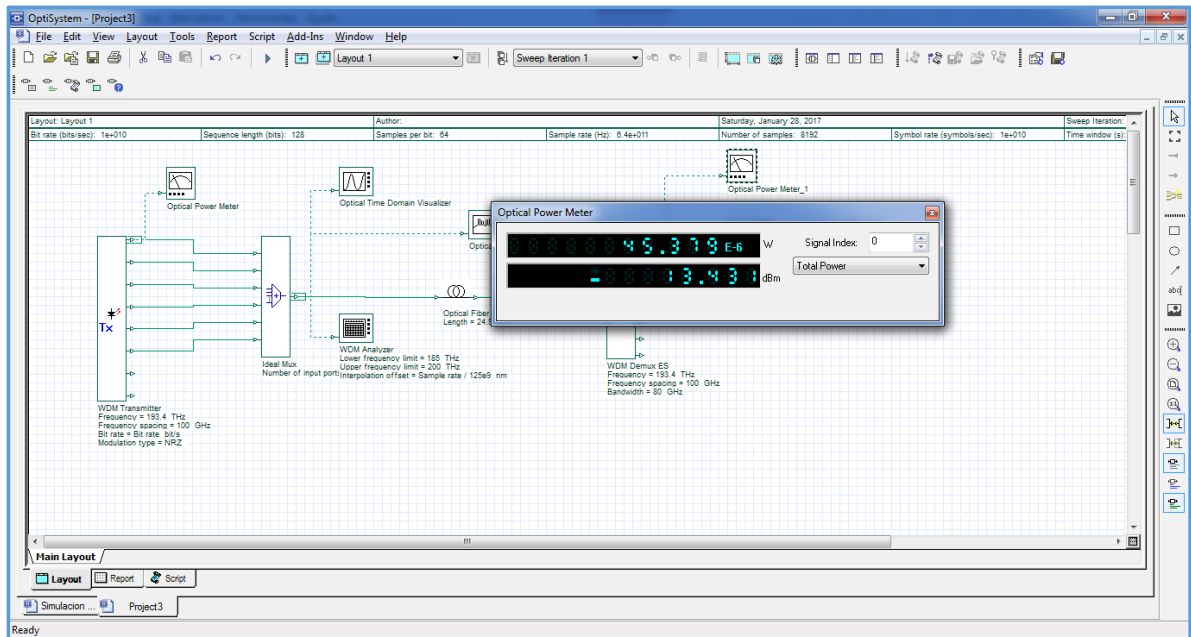


Figura 31. Medición de potencia a la salida del Demultiplexor Optico puerta 1.

Fuente: El autor – Software Optisystem

La sexta medición se realiza a la salida del receptor óptico mediante el analizador de BER. La figura 32 muestra el detalle de los resultados obtenidos (diagrama de ojo), en base a esto se puede garantizar una óptima transmisión ya que no se observa que los parámetros de ruido y jitter<sup>103</sup> puedan tener injerencia sobre la comunicación.

<sup>103</sup> Jitter: variación en la latencia entre paquetes que llegan al receptor.

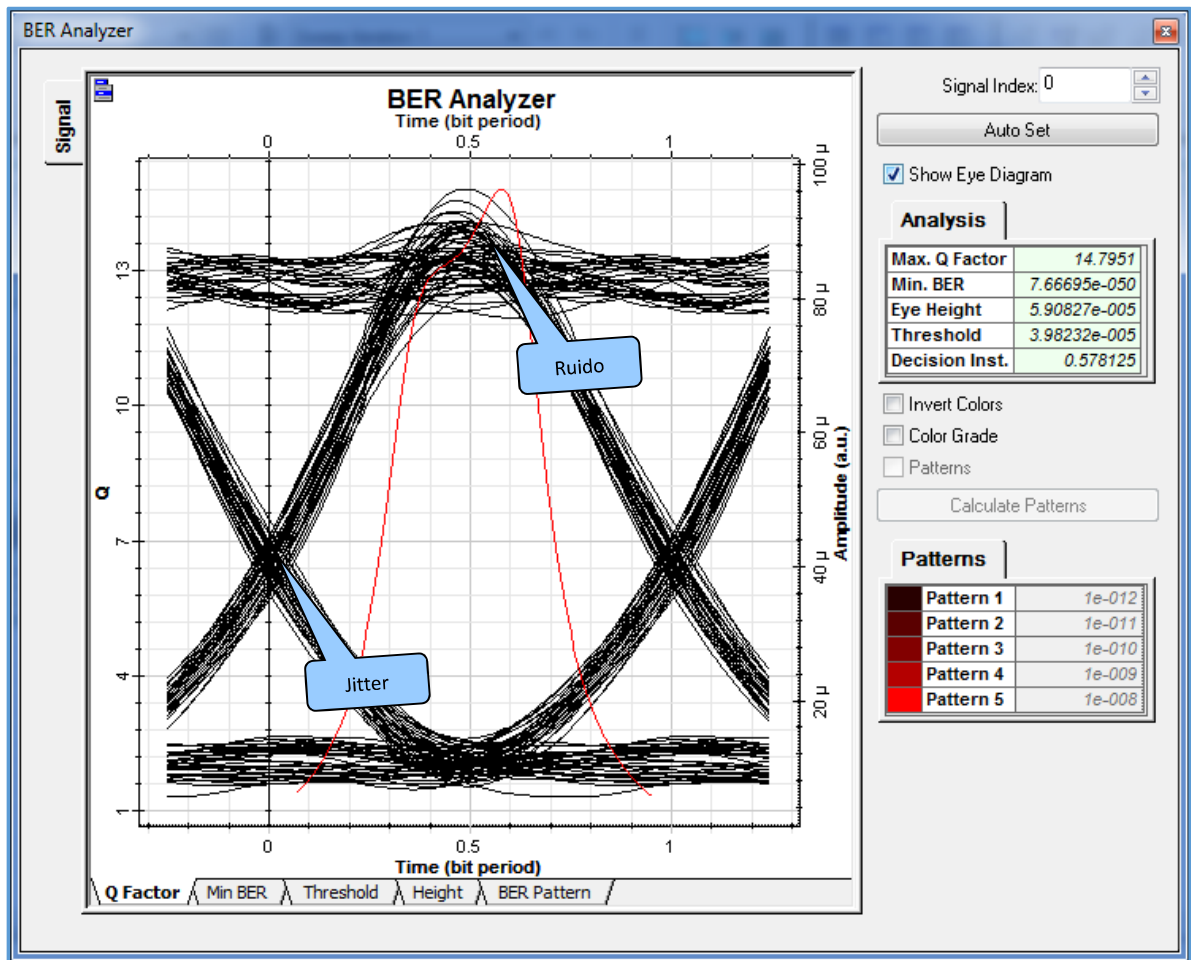


Figura 32. Diagrama de ojo – medición realizada a la salida del receptor óptico.

Fuente: El autor – Software Optisystem

Al realizar la simulación podemos verificar la autenticidad de los parámetros teóricos escritos y calculados. Por lo que se verifica que DWDM aprovecha las bondades de la fibra óptica como medio de transmisión, además de identificar que reduce los gastos de los proveedores al implementar estos sistemas con un alto rendimiento al realizar provisionamiento.

## 6 CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

1. Ya que una de las bondades, particularidades de la Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa es la integración de múltiples formatos en el envío de la información, permite que el proveedor de servicios haga empleo del ancho de banda sin tener que preocuparse por un conocimiento profundo de los equipos que se van a integrarse a esta tecnología por lo que se enfocan simplemente en el transporte de los datos.
2. Es de valiosa importancia la elección de los elementos que van a formar parte de la solución que se va a desarrollar. Uno de esos elementos y sin el cuál no sería posible en la práctica la puesta en marcha de un proyecto es la fibra óptica. El escogimiento debe ser realizado en base de alguna de las recomendaciones dadas por la ITU-T (G.652, G.653, G.655, G657), esto con el objetivo de minimizar problemas en cuanto al retardo, jitter, dispersión de las señales ópticas.
3. Es importante tener mucha consideración a la parte teórica para el desarrollo de la simulación. El software de simulación Optisystem es una herramienta muy valiosa al momento de querer llevar a la práctica (sin la necesidad obligatoria de comprar equipos para pruebas) un proyecto de comunicación, conexión o diseño como el presente ya que dispone de varios elementos que facilitan el aprendizaje y mejor comprensión de la operatividad del conjunto de elementos que conforman la solución.
4. Efectivamente en la simulación se observan que las frecuencias asignadas para el canal propuesto en el diagrama figura 24 y tabla 30 coinciden completamente con la verificación realizada por el analizador WDM. Se utilizó en el ingreso de datos lo establecido en la recomendación ITU-T G.694.1.
5. Al realizar la medición con el Power Meter podemos observar a la salida del Demux una potencia de -13,4 dBm, que estarían dentro del rango propuesto para este caso. Como se ve no se necesitaría de amplificadores como lo anotamos al realizar los cálculos teóricos.
6. Para el ejemplo de la simulación se utilizó la codificación NRZ y al revisar mediante un analizador de BER al final de la cadena de transmisión y recepción, es decir antes de que el receptor decida si los símbolos enviados son unos o ceros. Podemos indicar que no existe interferencia entre símbolos ya que todas las transiciones pasan por cero (en consecuencia no existiría jitter) y la apertura del ojo es abierta.
7. Para el crecimiento de redes SDH es necesaria la disponibilidad de contar con hilos de fibra (los cuáles deben ser probados antes de ser habilitados) y cada vez que exista esta necesidad

pues lo obvio es contar con más recursos en la Planta externa. De esta forma la importancia de la integración ente SDH y DWDM es grande, ya que esta última ofrece lambdas (longitudes de onda) sobre un par de hilos de fibra óptica sobre las cuáles es posible el envío del tráfico proveniente de las redes SDH y en consecuencia el crecimiento de estas sería no requeriría de factibilidades en recursos de fibra.

## 6.2 Recomendaciones

1. En cuanto a las recomendaciones, es necesario indicar que para un adecuado mantenimiento y control de la red se requiere que las siguientes condiciones sean cumplidas:
  - a. Contar con un adecuado número de spares (elementos de repuesto) y que estos se encuentren disponibles en tiempo y forma para un eventual cambio de alguna parte que sufra o presente falla.
  - b. Contar con el equipamiento de medición adecuado, tal es el caso de: power meter óptico, analizador de espectro óptico, analizador DWDM, analizador de BER, de los cuáles los tres primeros resultan esenciales.
  - c. Un adecuado y correcto entrenamiento del personal que va a realizar alguna actividad o van manipular los equipos que conforman la red.
  - d. Un adecuado y correcto uso de elementos de protección al ingresar a los nodos, al realizar pruebas o manipular equipos.
  - e. Contar con monitoreo fuerte y constante para tomar una acción rápida en el momento de encontrarse ante un evento de falla.
2. Se recomienda llevar a cabo un correcto (desarrollar un esquema) etiquetado de equipos, cables y llevar una bitácora de las conexiones, puertos, asignación de longitudes de onda, potencias iniciales, es decir las condiciones iniciales en las cuales se entrega el proyecto para que la operación sea la más correcta y contar con parámetros de comparación para el retorno a condiciones iniciales luego de presentarse un fallo en la red.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- ALCATEL-LUCENT. (2007). *Transmission Networks WDM technology Fundamentals*. Alcatel-Lucent.
- ARMAS, G. M., & MONTERO, G. A. (2012). *ESTUDIO Y DISEÑO MEDIANTE LA TECNICA DE TRANSMISION DWDM PARA LA RED SDH DEL ANILLO CENTRAL DE LA CIUDAD*. Quito.
- BUELVAS, D. A., TELLEZ, I. D., & MATEUS, E. A. (2009). *DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica.
- CADENA, E. J., & GOMEZ, D. L. (2002). *ESTUDIO Y DISEÑO PARA LA IMPLEMENTACION DE DWDM (MULTIPLEXACION Densa POR DIVISION DE LONGITUD DE ONDA)*. Quito.
- CAIZALUISA, J. L. (2009). *ESTUDIO PARA LA INTEGRACION DE LA TECNICA DE MULTIPLEXACION DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) DENTRO DE UN ENLACE QUITO - GUAYAQUIL*.
- CANARIA, U. D. (2001). *Características de transmisión de fibras ópticas*. Obtenido de [http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/Com\\_Opt\\_I/download/Com\\_Opt\\_I/Temario/caracteristicas.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/Com_Opt_I/download/Com_Opt_I/Temario/caracteristicas.pdf).
- GUEVARA, J. F. (Marzo de 2010). *ESTUDIO DE LA TECNOLOGIA ETHERNET SOBRE SDH (SYNCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY) Y PRUEBAS DE CANALIZACIÓN UTILIZANDO MULTIPLEXORES HIT7070, PARA EL TRAYECTO QUITO-GUAYAQUIL DE LA RED DE TRANSELECTRIC S.A.* Quito. Quito.
- HUIDROBO, J. M., & ROLDAN, D. (2004). *REDES Y SERVICIOS DE BANDA ANCHA - TECNOLOGIA Y APLICACIONES*. Mc. Graw Hill.
- HUIDROVO, J. M. (2003). *TECNOLOGIAS AVANZADAS DE TELECOMUNICACIONES*. Thompson Editores Spain. Paranainfo S.A.
- IJAREEIE. (2015). *DWDM LINK DESIGN AND POWER BUDGET CALCULATION*. Obtenido de [http://www.ijareeie.com/upload/2015/april/126\\_38\\_DWDM.pdf](http://www.ijareeie.com/upload/2015/april/126_38_DWDM.pdf).
- JARRIN, C. F., & MORA, B. H. (2003). *DESARROLLO DE UN PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA LA ACEPTACION DE ANILLOS DIGITALES DE FIBRA OPTICA EN TECNOLOGIAS SDH Y DWDM. Y ESTUDIO*.
- JIMÉNEZ, P. V. (2001). *SISTEMAS DE GESTIÓN Y SINCRONISMO PARA REDES BASADAS EN LA JERARQUÍA DIGITAL SINCRÓNICA (SDH)*.
- KARTALOPOULOS, S. V. (2000). *INTRODUCTION TO DWDM TECHNOLOGY - Data in a Rainbow*. IEEE Communications Society, sponsor.

- LAUDE, J.-P. (2002). *DWDM Fundamentals, Components and applications*. ARTECH HOUSE, INC.
- MORALES, C. G. (31 de Octubre de 2012). *INGENIERIA ELECTRONICA*. Obtenido de <http://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>
- MOYA, J. M. (2011). *TELECOMUNICACIONES, TECNOLOGIA, REDES Y SERVICIOS*. (E. d. U., Editor) Obtenido de [www.edicionesdelau.com](http://www.edicionesdelau.com).
- OPTISYSTEM. (s.f.). *OPTISYSTEM*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/143527180/OPTISYSTEM-TUTORAL>.
- PARRA, D. M. (2001). *"IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA WDM PARA LOS ANILLOS DE FIBRA ÓPTICA DE LOS VALLES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO"*. Quito.
- Physics, T. A. (2010). *Matemáticas con dB*. Obtenido de [http://www.eslared.org.ve/walc2012/material/track1/02-Matematicas\\_con\\_dB-es-v1.12-notes.pdf](http://www.eslared.org.ve/walc2012/material/track1/02-Matematicas_con_dB-es-v1.12-notes.pdf).
- PUERRES, A. E., & SALAZAR, D. E. (2015). *ESTUDIO Y SIMULACION DE LOS EFECTOS NO LINEALES MODULACION CRUZADA DE FASE (XPM) Y MEZCLA DE CUATRO LONGITUDES DE ONDA (FWM)*. Quito.
- PURICELLI, A. H. (2010). *Estudio y simulación de efectos no lineales en transmisión por Fibras ópticas*. Obtenido de [http://laboratorios.fi.uba.ar/II/archivos/tpfinal/Investigacion\\_fenomenos\\_Nolineales\\_Fibras\\_opticas.pdf](http://laboratorios.fi.uba.ar/II/archivos/tpfinal/Investigacion_fenomenos_Nolineales_Fibras_opticas.pdf).
- RIVERA, P. S. (2006). *ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BACKBONE DE FIBRA OPTICA PARA UN CARRIER CON TECNOLOGIA DWDM Y SOPORTE GMPLS (GENERALIZED MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING)*. Quito.
- ROSALES, L. A. (2012). *REDES CON TECNOLOGÍA ADD-DROP MULTIPLEXER ÓPTICOS REDIRECCIONABLES ROADM FRENTE A REDES DWDM, MPLS Y SDH*. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0312\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0312_EO.pdf).
- SYSTEMS, C. (2004). *OPTICAL NETWORK DESIGN AND IMPLEMENTATION*. Obtenido de [https://books.google.com/books?id=5LMp7yxfeDAC&pg=PA102&lpg=PA102&dq=ITU-T+DWDM+C-BAND&source=bl&ots=hK2a-69hY4&sig=XI\\_PJx5CgWooufeoBFtkbSwgMJ4&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjNIJ-K5a3PAhXChpAKHe3ODhM4FBD0AQhYMAg#v=onepage&q=ITU-T%20DWDM%20C-BAND&f=false](https://books.google.com/books?id=5LMp7yxfeDAC&pg=PA102&lpg=PA102&dq=ITU-T+DWDM+C-BAND&source=bl&ots=hK2a-69hY4&sig=XI_PJx5CgWooufeoBFtkbSwgMJ4&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjNIJ-K5a3PAhXChpAKHe3ODhM4FBD0AQhYMAg#v=onepage&q=ITU-T%20DWDM%20C-BAND&f=false).
- SYSTEMS, C. (s.f.). *Introduction to DWDM Technology*. 2001: Cisco Systems.
- TECHTARGET, M. . (s.f.). *WDM NETWORK DESIGN -1*. Obtenido de [http://media.techtargert.com/searchNetworking/Downloads/wdm\\_network\\_design.pdf](http://media.techtargert.com/searchNetworking/Downloads/wdm_network_design.pdf).



UTRERAS, F. P. (2013). *PROPUESTA DE UN MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA EL MANTENIMIENTO Y DETECCION DE FALLAS PARA UNA RED METROPOLITANA QUE UTILIZA LA TECNOLOGIA DWDM (DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)*. Quito.

VASQUEZ, D. E. (2009). *ESTUDIO DE REDES DE TRANSPORTE OPTICO (OTN), COMO PLATAFORMA PARA REDES MULTISERVICIOS*. Quito.

## **8 ANEXOS**

Los anexos se incluyen en el CD como archivos adjuntos para la revisión de cada uno de ellos (en total: 9 archivos PDF y 1 tabla de excel).